



Contribution à la connaissance de l'aléa sismique en Principauté de Monaco

Philippe Mondielli

► To cite this version:

Philippe Mondielli. Contribution à la connaissance de l'aléa sismique en Principauté de Monaco. Géologie appliquée. Université Nice Sophia Antipolis, 2005. Français. NNT : . tel-00424190

HAL Id: tel-00424190

<https://theses.hal.science/tel-00424190>

Submitted on 14 Oct 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**UNIVERSITE DE NICE – SOPHIA ANTIPOLIS
FACULTE DES SCIENCES**

THESE

Présentée pour obtenir le grade de :
Docteur en Sciences de l'Université de Nice - Sophia Antipolis
Spécialité : Sciences de l'Univers

par :

Philippe MONDIELLI

**CONTRIBUTION A LA CONNAISSANCE
DE L'ALEA SISMIQUE EN
PRINCIPAUTE DE MONACO**

Soutenue le 3 novembre 2005 à l'Université de Nice devant le jury composé de :

Jean Marc LARDEAUX
Jean Pierre IVALDI
Jean FERRANDINI
Jean François SEMBLAT
Olivier BELLIER
Raoul CARUBA

Président du Jury
Directeur de Thèse
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur

**Travaux réalisés au sein de la Direction de l'Environnement
de l'Urbanisme et de la Construction de la Principauté de Monaco.
23 avenue Prince Héréditaire Albert, MC-98000 Monaco**

REMERCIEMENTS

Mes plus vifs remerciements s'adressent au Gouvernement Princier qui m'a donné les moyens d'apporter une caution scientifique à cette étude et plus particulièrement à tous mes chefs de service qui se sont succédés :

Monsieur Patrick Van Klaveren, actuellement Délégué à l'Environnement International et Méditerranéen, qui s'est engagé personnellement dans le démarrage de cette thèse,

Monsieur Patrice Cellario, actuellement Directeur de la Prospective et des Etudes Urbanistiques, qui a toujours suivi avec intérêt l'évolution de ce travail et la sismologie en général,

Madame Maud Gamerdinger, Directeur de l'Environnement, de l'Urbanisme et de la Construction, qui m'a offert les meilleures conditions de travail afin que je puisse mener à terme cette thèse.

Toute ma gratitude à Jean-Pierre Ivaldi, Directeur du Laboratoire de Géologie Dynamique et Appliquée de l'Université de Nice-Sophia Antipolis, qui s'est engagé en tant que Directeur de thèse et qui m'a guidé tout au long de ce parcours.

Je remercie tous les membres du jury qui m'ont fait l'honneur de s'investir dans ce travail :

- Monsieur le Professeur Jean-Marc Lardeaux, Président de la Commission scientifique des sciences de la terre de l'INSU-CNRS, qui a accepté de présider mon jury, qu'il trouve ici toute l'expression de ma reconnaissance pour les discussions « post-thèse » concernant l'avenir de la sismologie à Monaco ;
- Monsieur le Professeur Olivier Bellier, Directeur de la branche Environnement du CEREGE, qu'il accepte toute ma gratitude pour la dissection constructive et moderne de mon mémoire ;
- Monsieur Jean-François Semblat, Ingénieur Divisionnaire des Travaux Publics de l'Etat, chargé de Cours à Polytechnique et rapporteur de ma thèse, merci pour les échanges animés sur les effets de site si particuliers à Monaco ;
- Monsieur le Professeur Raoul Caruba, Directeur de l'IRIM, toute ma reconnaissance pour son soutien et pour nos échanges amicaux tout au long de ce travail ;
- Monsieur Jean Ferrandini, rapporteur de ma thèse, avec lequel j'ai pu mesurer la grandeur de la mer Ligure. Merci pour ses critiques constructives réalisées avec célérité.

Ma gratitude s'adresse à tous les « locaux » qui m'ont aidé et soutenu durant toutes ces années : Nicole Bethoux, collègue de mes premières heures au Service de l'Environnement de Monaco qui m'a suivi tout au long de ce parcours; Anne Marie Duval et Etienne Bertrand de la cellule risques du CETE qui ont toujours été très disponibles à mon égard ; Jean Louis Perez du CETE avec lequel le terme recherche prenait tout son sens sur le terrain ; Jean-Pierre Meneroud, ancien responsable de la cellule risque du CETE, initiateur de ce projet de thèse, qui m'a apporté sa contribution jusqu'à la soutenance ; Bertrand Delouis, qui a toujours pris le temps de m'écouter et de me conseiller ; André Laurenti pour nos discussions passionnantes

sur les dégâts régionaux du séisme de 1887 ; Christian Thibault du CETE pour ses conseils sur l'analyse technique des dégâts sur le bâti monégasque engendrés par le séisme Ligure ; et enfin toute l'équipe de Géosciences Azur, avec Françoise Courboux, Anne Deschamps, Christophe Larroque et Stéphane Gaffet qui ont toujours fait preuve d'attention.

Merci à Monsieur Jérôme Lambert du BRGM de m'avoir fourni la version numérique de la base de données Sisfrance 2003 pour la région s'étendant autour de Monaco.

Merci à Yann Ageon, ingénieur au CNRS avec qui j'ai mis au point le système d'alerte sismique de Monaco, pour les traitements réalisés sur les données marégraphiques du micro-tsunami de Boumerdès du 21 mai 2003 et pour son soutien tout au long de cette thèse.

Ma gratitude à mon chef de la division risques et nuisances de la DEUC, Monsieur André Veglia, pour ses conseils et son investissement dans les corrections de mon mémoire.

Merci à Monsieur Claude Passet, pour son expertise sur la valeur des données historiques exploitées dans mon mémoire et à Madame Jacqueline Carpine-Lancré pour ses recherches sur les réactions du Prince Albert 1^{er} au séisme du 23 février 1887.

Mes remerciements vont également vers toutes les personnes détentrices de la mémoire écrite de la Principauté :

- Monsieur Barral, Conservateur de la Bibliothèque Louis Notari, et Monsieur Burle, responsable du Fond régional, pour les discussions sur le séisme de 1887 et leur contribution dans la mise à disposition des photos, des plans et des textes de cette époque.
- Monsieur Lecuyer, Conservateur des archives du Palais Princier, pour la mise à disposition des courriers et des rapports sur le séisme du 23 février 1887 rédigés par les responsables monégasques dans les jours qui ont suivi ce tremblement de terre.
- Monsieur Menini, Archiviste du service des Travaux Publics, pour la mise à disposition des rapports et des cartes géologiques concernant le sous-sol de la Principauté.

Ma gratitude aux nombreux stagiaires qui ont participé de près ou de loin à ce travail : Sophie Robin, Candice Bruyère, Myriam Belfiore, Laure Croce, Thomas Sobrier, et particulièrement Etor Querendez qui n'a jamais ménagé son temps et son énergie pour m'aider à traiter les enregistrements sismologiques.

Grand merci à tous les correcteurs « de forme » avec en premier lieu mes parents et les fidèles correctrices de tous mes ouvrages : Astrid Rusin et Evelyne Schommers.

Toute ma sympathie et mes remerciements à mes collègues de la DEUC qui m'ont accompagné durant toutes ces années.

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION..... 11

1. Présentation de l'étude..... 11

1.1. Historique de l'étude	11
1.2. La Principauté de Monaco entre Alpes et Méditerranée	11
1.3. La zone d'étude	12
1.4. Le risque sismique en Principauté.....	13
1.4.1. Terminologie	13
1.4.2. Monaco, un site vulnérable face à l'agression sismique	14
1.4.2.1. Un contexte urbanistique, économique et social particulier	14
1.4.2.2. Un développement urbanistique tourné vers la mer.....	14
1.4.3. Des actions gouvernementales pour faire baisser la vulnérabilité au séisme.....	16
1.4.3.1. Un règlement qui s'est adapté au développement urbanistique	16
1.4.3.2. Sensibilisation de la population au risque sismique.....	18
1.4.4. Conclusion sur l'approche du risque sismique à Monaco.....	19

2. Protocole d'analyse 20

2.1. Techniques d'analyses géomatiques	20
2.1.1. Les documents utilisés	20
2.1.2. Les documents réalisés.....	21
2.2. Etude de terrain	21
2.3. Analyse sismotectonique.....	21
2.4. Composition et utilisation du S.I.G.....	22
2.5. Application des lois d'atténuation.....	22
2.6. Traitements de la sismicité instrumentale pour la détermination des effets de site	22
2.7. Etude macrosismique du séisme de 1887.....	23
2.8. Discussion sur l'aléa tsunami.....	23

CHAPITRE 2 : ETAT DES CONNAISSANCES EN MATIERE DE PALEOTECTONIQUE ET DE TECTONIQUE ACTIVE REGIONALES ET LOCALES 25

1. Paléotectonique..... 25

1.1. Structure générale de l'arc de Nice et de ses abords	25
1.1.1. Présentation géographique et structurale.....	25
1.1.2. Histoire tectonique de la région	27
1.2. Découpage crustal régional des Alpes maritimes franco-italiennes.....	29
1.2.1. Accidents bordiers subméridiens décrochevauchants Est et Ouest de l'arc de Nice	30
1.2.2. Les accidents de la famille linéamentaire N 40° E.....	30
1.2.3. La famille linéamentaire N120-140° E	30
1.3. Découpage crustal local du site de Monaco	31

2. La géodésie..... 33

3. Tectonique active..... 33

3.1. Sismicité des Alpes maritimes franco-italiennes	33
3.1.1. Sismicité historique	34
3.1.2. Sismicité instrumentale	37
3.1.3. Sismicité et tectonique	39
3.1.3.1. Corrélations entre sismicité et accidents tectoniques	39
3.1.3.2. Principales failles actives connues autour de Monaco dans l'arc de Nice	41
3.1.3.2.1. Généralités sur les failles actives reconnues dans la région	41
3.1.3.2.2. Activité sismique dans la zone de la faille de Peille-Laghet ou faille de Blausasc	42
3.1.3.2.3. Activité sismique dans la zone de la faille Monaco-Sospel et de celle de Sospel-Saorge	46
3.1.3.2.4. Activité sismique du bassin ligure	47
3.2. Sismicité ressentie sur le territoire monégasque	47
4. Conclusion sur la tectonique active	49
 CHAPITRE 3 : ANALYSE GEOMATIQUE DE LA DEFORMATION FRAGILE REGIONALE	
51	
1. La déformation fragile finie et ses échelles d'observation	52
1.1. Intérêt de l'analyse géomatique dans la région	52
1.2. Définition des termes appliqués à l'observation de la déformation fragile finie	52
1.2.1. Les indices de déformation	52
1.2.2. Comportement rhéologique des roches	53
1.2.3. Définition des différentes échelles d'alignements d'objets sur les images satellitales	53
2. Méthodologie	54
2.1. Choix d'un partenariat avec une entreprise spécialisée	54
2.2. Description de la méthodologie appliquée dans cette étude	54
2.3. Les particularités des images de Landsat 5	55
2.4. Les Modèles Numériques de Terrains (M.N.T.) et les variables morphométriques	56
3. Les traitements	57
3.1. Images satellitales	57
3.2. M.N.T.	58
3.2.1. MNT composite terre-mer à pas de 50 m	59
3.2.2. MNT composite à pas de 10 mètres autour de Monaco	60
3.3. Remarques sur la qualité des documents bruts	62
3.4. Procédure d'analyse des documents	62
4. Résultats	64
4.1. Les familles d'alignement d'extension régionale	64
4.1.1. Domaine terrestre	64
4.1.1.1. Hiérarchisation des familles de directions de ces alignements	64
4.1.1.2. Hiérarchisation des principaux alignements en terme de longueur	66
4.1.1.3. Etude de la réalité tectonique des principaux alignements régionaux mis en évidence	66
4.1.2. Domaine marin	75
4.2. Les familles d'alignements d'extension locale	77
4.3. Synthèse	80

CHAPITRE 4 : ANALYSE STRUCTURALE, MICROSTRUCTURALE ET SISMOTECTONIQUE..... 81

1. Analyse de la tectonique régionale et locale.....	81
1.1. Introduction	81
1.2. Protocole d'analyse	81
1.3. Méthodologie	81
1.4. Résultats des mesures de terrains	82
1.4.1. Résultats à l'échelle régionale.....	84
1.4.1.1. Accident de Monaco-Sospel.....	84
1.4.1.2. Les accidents de Peille-Laghet et de Peille- Cap d'Ail	87
1.4.1.3. Les accidents des bordures Est, Ouest et Nord de la zone de Peille	91
1.4.1.4. Les grands alignements E-O de la région.....	94
1.4.2. Résultats à l'échelle locale : le bassin versant de Monaco.....	97
1.4.2.1. Mesures de surface	97
1.4.2.2. Mesures souterraines	98
1.4.2.3. Conclusion des observations et mesures réalisées à l'échelle locale	100
1.5. Conclusion sur les champs de déformation.....	101
2. Analyse de la sismotectonique.....	103
2.1. Les mécanismes au foyer	103
2.1.1. Méthodologie et calcul de nouveaux mécanismes au foyer	103
2.1.2. Synthèse sismotectonique régionale.....	105
2.2. Les états de contrainte	107
2.2.1. Généralité sur le calcul de l'état de contrainte	108
2.2.2. Méthodologie employée et données exploitées.....	108
2.2.3. Les états de contrainte du Sud-Est de la France.....	108
2.2.4. Calcul d'un nouvel état de contrainte pour la région proche de Monaco	109
2.3. Conclusion sur la sismotectonique de la région proche de Monaco	113
3. Synthèse sur les principaux accidents mis en évidence dans la région.....	114
3.1. L'accident de Monaco – Sospel – Breil - Saorge.....	114
3.2. Les accidents de Peille - Laghet et Peille- Cap d'ail.....	115
3.3. Les accidents N100°E « Col Saint Michel – Sospel » et « Paillon - Monaco ».....	116

CHAPITRE 5 : DETERMINATION DU SEISME DE REFERENCE POUR MONACO117

1. Application des lois d'atténuation existantes.....	117
1.1 Détermination des vitesses et/ou accélérations atteintes sur Monaco par l'application des lois existantes sur des séismes non mesurés à Monaco.	118
1.1.1. Application des lois d'atténuation pour la sismicité historique	118
1.1.2. Application des lois d'atténuation pour la sismicité de ces 50 dernières années.	121
1.1.3. Synthèse des accélérations maximales calculées par les lois d'atténuation pour les séismes principaux	123
1.2. Tentative de définition d'une loi d'atténuation adaptée au contexte monégasque.....	125
1.2.1. Exploitation des enregistrements accélérométriques sur Monaco	125
1.2.2. Exploitation des enregistrements velocimétriques sur Monaco.....	128
2 Prise en compte des zones sismogènes.....	131
2.1. Apport de la sismicité historique.....	132

5. Analyse des dégâts de 1887	171
5.1. Méthodologie	171
5.2. Etat des structures et de l'urbanisation en 1887	171
5.3. Moyens d'études des dégâts	175
5.4. Description des dégâts	175
5.4.1. Zone du Rocher, secteur A	176
5.4.2. Zone de La Condamine, secteur B	178
5.4.3. Zone de Monte-Carlo, secteur C	179
5.4.4. Zone de Saint-Roman, secteur D	179
5.5. Synthèse des dégâts observés et définition de l'intensité macrosismique	180
6. Conclusion sur l'apport des nouveaux résultats au microzonage.....	182
7. Approche de l'aléa tsunami.....	182
7.1. Les différents types de tsunamis qui pourraient atteindre Monaco	183
7.2. Traitement du microtsunami enregistré à Monaco le 21 mai 2003	184
7.3. Les particularités de Monaco face au risque de tsunami	185
8. Poursuite des investigations.....	185
8.1. Développement du réseau de stations sismologiques	185
8.2. Mise au point d'un marégraphe couplé au système d'alerte sismique	186
8.3. Bâti actuel et vulnérabilité – les actions	186
CHAPITRE 7 : CONCLUSIONS.....	191
1. Les avancées sur la connaissance de l'aléa sismique sur Monaco	191
2. Approche du risque sismique à Monaco : limites et perspectives	193
3. Réflexion finale sur la Principauté de Monaco face au risque sismique	193
BIBLIOGRAPHIE	195
ANNEXES	205
Annexe 1 : Les séismes historiques – dégâts et cartes isoséistes.	207
Annexe 2 : La télédétection et les rayonnements.	211
Annexe 3 : Le Modèle Numérique de Terrain et les variables morphométriques.	213
Annexe 4 : Méthode Carey-Gailhardis et Mercier	215
Annexe 5 : Journal de Monaco du 1 ^{er} mars 1887	217
Annexe 6 : Rapport hebdomadaire Mairie de Monaco secousse février 1887	219
Annexe 7 : Rapport de la Commission des Travaux Publics, séisme de 1887	221
Annexe 8 : Rapport sur les dégâts constatés au Palais suite à la secousse de 1887	225
Annexe 9 : Méthodologie utilisée pour la détection des séismes ou des tsunamis	229

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

1. Présentation de l'étude

1.1. Historique de l'étude

Cette étude a pour origine une réunion tenue le 1^{er} octobre 1996 en Principauté de Monaco qui a regroupé les spécialistes du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), les responsables du Service des Travaux Publics et ceux du Service de l'Environnement de Monaco. L'objectif de cette réunion était de définir des spectres normalisés, élastiques et de dimensionnement à appliquer dans les diverses zones de la Principauté en utilisant les résultats de l'étude du microzonage réalisée en 1991-1992. Cette réunion a de plus suggéré le développement d'études et de recherches dans au moins deux directions visant l'une à mieux définir les événements susceptibles d'intéresser la Principauté, l'autre à mieux préciser l'effet de l'action sismique sur des bâtiments fortement encastrés dans le sol (note interne 502/PC-NM/2986-96).

A la suite de cette réunion, le Service de l'Environnement proposait d'entreprendre une étude approfondie destinée à réviser le séisme pris pour référence en Principauté de Monaco. La réglementation parasismique monégasque reposait alors et repose encore aujourd'hui sur l'hypothèse d'un séisme de magnitude 6.5 à 30 km. Cependant les éléments du raisonnement ayant conduit à ces valeurs ne sont pas définis. Cette étude devait confirmer ou proposer des modifications à cette hypothèse sur des données clairement établies et donc susceptibles, à plus long terme, d'analyses critiques aux fins de nouvelles actualisations ou contre-propositions (note interne JMM/ pad-97/ 212).

Cette étude pouvait être menée par un agent de l'administration monégasque du Service de l'Environnement en charge de la sismologie à Monaco, en collaboration avec le CETE de Nice et l'Université de Nice. Une convention est signée en mai 1998 par le Centre de Recherche de Géologie Méditerranéenne de l'Université de Nice Sophia-Antipolis, le laboratoire de Nice du Centre d'Etudes Techniques de l'Equipeement, la société Eosys et le Service de l'Environnement de Monaco.

1.2. La Principauté de Monaco entre Alpes et Méditerranée

La Principauté de Monaco est située sur la côte sud de l'Europe occidentale à égale distance du détroit de Gibraltar et de celui des Dardanelles. Le territoire de Monaco est la frange littorale d'un bassin versant qui, au-delà d'une altitude de 200 mètres environ est situé en France. Ce bassin versant fait partie de la façade maritime des Alpes occidentales, il est caractérisé par son relief prononcé dominant la Méditerranée. Le bassin versant qui abrite Monaco est un cirque montagneux. En moins de 3 km, l'altitude varie du niveau de la mer à 1143 m au Mont Agel qui en est son point culminant. Le relief sous-marin est comparable au relief terrestre et en moins de 6 km, en l'absence de plateau continental, les 2000 mètres de profondeur sont atteints.

Le bassin versant de Monaco est situé en bordure du domaine alpin et son histoire est intimement liée à la genèse des Alpes. Il y a 245 millions d'années (Ma), l'Europe et

l'Afrique appartenait à un même continent qui commençait à s'ouvrir à l'aplomb du futur domaine alpin. Au Jurassique, il y a 180 Ma, l'écartement continuant, un océan (la Téthys) est apparu entre ce qui allait devenir le continent eurasiatique et le continent africain. Les mouvements s'inversèrent il y a environ 120 Ma au Crétacé inférieur. A partir du Crétacé supérieur (80 Ma) et jusqu'à aujourd'hui, l'Afrique dont l'Apulie (Italie) ne vont plus cesser de se rapprocher de l'Europe. Ces rapprochements, s'accompagnant de collisions, conduisent à la structuration progressive des Alpes occidentales. Dans notre région, l'activité tectonique a atteint son paroxysme au Paléogène et au Néogène. La déformation des couvertures primaires (carbonifère et permien) et secondaire débute au Bartonien (43 Ma). Le soulèvement du massif cristallin de l'Argentera Mercantour à l'origine de ces déformations donna cette configuration de structure en écaillés qui caractérise le bassin versant de Monaco.

Par ailleurs, bien que de fréquence relativement modérée, mais parfois avec une intensité forte, la sismicité témoigne de l'activité actuelle de cette partie des Alpes méridionales.

1.3. La zone d'étude

Une zone d'étude est définie par l'aire géographique susceptible de contenir une faille active dont le jeu pourrait occasionner des dégâts humains ou matériels à Monaco.

L'étendue spatiale des zones étudiées est fonction des données disponibles et/ou exploitables qui sont adaptées à la problématique de chaque partie de cette étude.

La zone d'étude pour la partie sismotectonique est une aire géographique de 100 km de longueur sur 80 km de large c'est-à-dire de la longitude 7° à 8° et de la latitude 43°5 à 44° que nous nommerons Alpes maritimes franco-italiennes. Monaco y est légèrement excentré vers l'ouest (la zone à l'ouest d'Antibes étant considérée comme beaucoup moins sismique que l'extrémité sud-est des Alpes-Maritimes et la Ligurie en Italie).

La zone d'étude couverte par les images satellitales est plus restrictive : elle comprend la partie Sud-Est du département des Alpes-Maritimes et la partie Ouest de la Ligurie. Plus précisément cette zone s'étend de Saint-Laurent-du-Var à Bordighera et de la latitude d'Utelle à une vingtaine de kilomètres au sud de la côte.

Les limites de la zone d'étude pour la détermination détaillée des champs de contraintes locaux autour de Monaco sont celles d'une aire géographique de 10 km de large et de 20 km de haut. De Eze à Menton, elle est limitée au nord par les crêtes méridionales du bassin versant de Sospel.

Le choix de la zone d'étude au sens large s'est donc porté sur une aire géographique comprenant des systèmes géologiques bien distincts et délimités, comme l'arc de Nice dans la partie occidentale de cette aire et la nappe de Flysch à helminthoïde des unités penniques de la Ligurie dans sa partie orientale. Ces deux ensembles structuraux sont séparés par une zone complexe fortement écaillée connue dans la littérature sous le nom « d'arc de la Roya » (Gèze, 1960; Perez, 1975).

1.4. Le risque sismique en Principauté

La Principauté de Monaco s'étend sur 2,02 km², avec 0,52 km² gagnés sur la mer dont 0,23 km² pour le seul terre-plein de Fontvieille (Figure 1). La population est de 32.000 habitants. La Principauté offre un bassin de plus de 40.000 emplois et 28.000 travailleurs rejoignent chaque jour Monaco pour y travailler. C'est de plus un haut lieu touristique avec un accueil de plus de six millions de visiteurs par an dont 262.520 passent au moins une nuit dans les hôtels monégasques.

La Principauté de Monaco située en pied de bassin versant, avec plus de 25% de son territoire gagné sur la mer, est une zone urbaine qui présente une grande vulnérabilité à l'agression sismique.

1.4.1. Terminologie

La gestion du risque sismique implique la connaissance des composantes de ce risque qui sont au nombre de deux : l'aléa et la vulnérabilité.

$$\text{Risque} = \text{aléa régional} \times \text{aléa local} \times \text{vulnérabilité} \times \text{enjeux}$$

L'aléa régional se définit comme la probabilité d'occurrence d'un événement de magnitude ou d'intensité fixée dans un laps de temps donné sur un territoire défini. L'aléa représente alors la possibilité pour un site, dont la surface serait de façon idéale topographiquement et géologiquement homogène, rocher horizontal par exemple, d'être soumise à une secousse sismique de caractéristiques données.

L'aléa local se réfère à l'agressivité de cet événement sur une parcelle homogène. Cette agressivité dépend de l'amplitude du mouvement sismique sur le site considéré, mais aussi de phénomènes induits par le tremblement de terre tels que la liquéfaction ou les mouvements de terrains. L'aléa local traduit les effets prévisibles de cette secousse sur le site en fonction de ses caractéristiques topographiques, géologiques et géotechniques propres.

Cet aléa local peut se présenter sous deux aspects fondamentaux :

- Les effets de site (effets directs) : ils traduisent la modulation du mouvement sismique de référence compte-tenu des conditions de site, à la fois en amplitude temporelle et en contenu fréquentiel. Ce type d'effet a depuis longtemps été observé après l'occurrence des séismes, par exemple à Caracas en 1967 (Pecker, 1984), à Mexico en 1985 (Esteva, 1988). Ces effets de site peuvent être analysés par des mesures expérimentales in-situ ou par des études numériques.
- Les effets induits : ils correspondent aux grands déplacements de sols induits par les vibrations sur des formations superficielles. Il s'agit principalement du phénomène de liquéfaction, des mouvements de terrain comportant des glissements en masse et des éboulements rocheux.

Chapitre 1 : Généralités sur Monaco et le risque sismique

Le quart du territoire monégasque est gagné sur la mer grâce à l'édification de terre-pleins réputés pour leurs mauvais comportements géotechniques. Une partie importante du territoire est donc sujette aux effets de sites (amplifications) et aux effets induits (liquéfaction).

La concentration du territoire de la Principauté en pied de bassin versant le rend naturellement sensible aux éventuels mouvements de terrain ou chutes de blocs pouvant être déclenchés par des mouvements sismiques. Le développement du bâti en bord de mer le rend vulnérable à d'éventuels mouvements de mer. En effet la situation côtière de la Principauté avec une partie de son patrimoine immobilier construit les pieds dans l'eau induit que sa population peut être affectée par un éventuel tsunami.

Le microzonage sismique constitue en fait la traduction cartographique de l'aléa local. Il prend en compte la modification du signal sismique par les conditions locales et les phénomènes induits par la vibration. A Monaco il a été réalisé sur la totalité du territoire en 1991 (CETE, 1992).

La vulnérabilité : traduit la sensibilité du bâti et des infrastructures à l'agression d'un tremblement de terre. Elle dépend de la réponse mécanique des structures à la sollicitation sismique.

Les enjeux : ils ont une importance majeure dans les zones à sismicité modérée car ils peuvent accroître sensiblement le niveau du risque. La Principauté, de par sa configuration territoriale et urbanistique particulière, présente des enjeux économiques, politiques et sociaux très importants.

1.4.2. Monaco, un site vulnérable face à l'agression sismique

1.4.2.1. Un contexte urbanistique, économique et social particulier

Monaco présente une haute densité de population (16000 hab/km²). Les seules possibilités d'extension de l'urbanisation monégasque sont soit en mer, soit avec le développement d'un bâti dominé par des tours. Cette urbanisation limitée dans l'espace implique également l'exploitation du sous-sol par de nombreux tunnels pour enterrer les voies de circulation : la gare et la voie du chemin de fer en sont l'exemple.

Dans le quartier de Fontvieille une zone industrielle regroupe en moins de 0,5 km² une usine d'incinération, une station de traitement des eaux et des industries chimiques. Il s'agit d'une zone névralgique à haut niveau de vulnérabilité en matière sismique.

L'ensemble de la population et le pouvoir étatique institutionnalisé sont concentrés dans moins de 2 km². Une secousse majeure, c'est-à-dire supérieure à l'intensité atteinte à Monaco par le séisme Ligure de 1887, rendrait inopérants les organismes décisionnels et fragiliserait fortement l'appareil étatique.

1.4.2.2. Un développement urbanistique tourné vers la mer

Pour augmenter la superficie du territoire, voilà plus de cent ans que la Principauté se tourne vers la mer. L'historique ci-dessous met en évidence le développement de l'urbanisation à Monaco depuis la fin du XIX^{ème} siècle :

En 1890, le terre-plein du quartier industriel de Fontvieille commence à voir le jour. En 1900 le territoire s'est déjà agrandi de 5 ha et le terre-plein de Fontvieille est limité par la route du bord de mer (actuelle avenue Prince Héréditaire Albert).

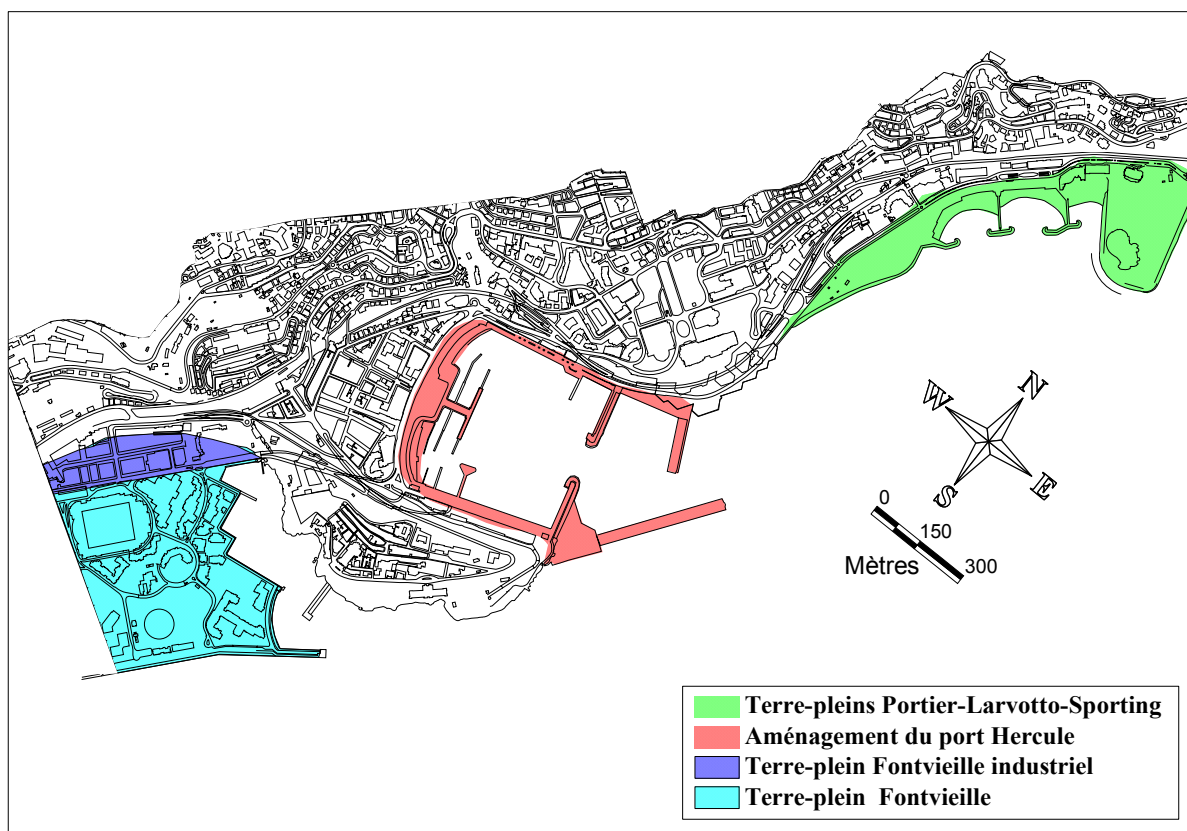


Figure 1 : Territoire de la Principauté avec figuration des différents terre-pleins construits sur la mer (fond topographique – DEUC).

En 1958 c'est le début de la réalisation du terre-plein du Portier, à l'ouest du quartier du Larvotto (+ 3,5 ha), qui est achevé en novembre 1961. En décembre 1963 c'est l'achèvement des terre-pleins du Sporting et du Larvotto (+ 6,4 ha).

En 1971, ce sont 22 ha gagnés sur la mer grâce au terre-plein de Fontvieille (Figure 2).

Depuis 2002, la superficie de Monaco s'est encore agrandie de 0,05 km² par l'aménagement du port Hercule avec la nouvelle digue, son terre-plein attenant, la contre-jetée et le comblement de la partie ouest du port.

Année	Terrains pris sur la mer	Superficie du terrain en ha	Superficie du territoire en ha
1880	aucun	0	150
1900	Terre-plein du quartier industriel de Fontvieille	5	155
1961	Terre-plein du Portier	3,5	158,5
1963	Sporting + Larvotto	12,9	171,4
1971	Terre-plein de Fontvieille	22	193,4
2003	Aménagement du Port Hercule	8,85	202,25

Tableau 1 : Evolution de la superficie du territoire de Monaco après la perte des territoires de Menton et de Roquebrune lors du traité franco-monégasque de 1861.

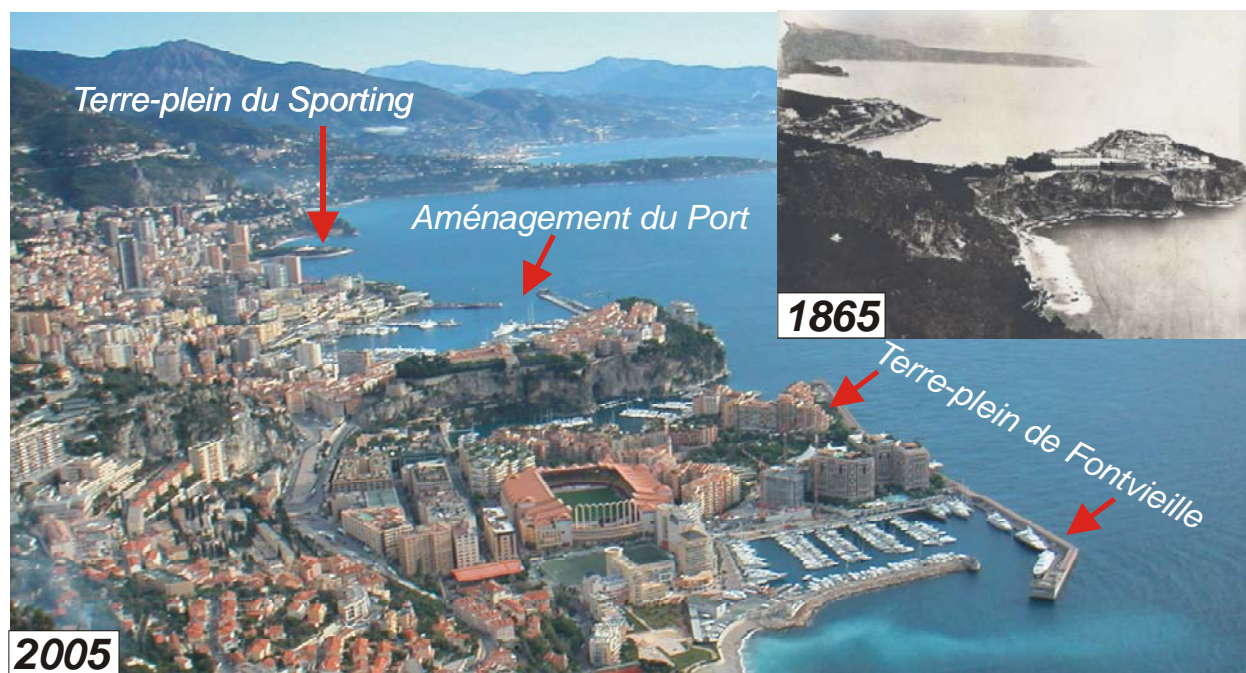


Figure 2 : Le Rocher de Monaco avec à son pied la plage de Fontvieille (photo de 1865) qui a laissé sa place en 1971 aux 22 hectares du terre-plein de Fontvieille (photo de 2005).

1.4.3. Des actions gouvernementales pour faire baisser la vulnérabilité au séisme

1.4.3.1. Un règlement qui s'est adapté au développement urbanistique

Le séisme n'est dangereux pour les vies humaines qu'au travers des dommages qu'il inflige aux constructions et à leur contenu. L'essentiel de la protection contre les séismes réside donc dans la réalisation d'ouvrages capables de résister à leurs effets les plus destructeurs.

La préoccupation du risque sismique a conduit dès 1966 l'Etat de Monaco à prendre en compte ce risque majeur dans un texte réglementaire. L'Ordonnance Souveraine n° 3.647 du 9 septembre 1966, modifiée, portant règlement d'Urbanisme, de Construction et de Voirie toujours en vigueur, prévoit dans les pièces constitutives du dossier nécessaire à l'instruction du permis de construire à l'article 3 alinéa 15 : « une note donnant toutes les indications utiles sur la stabilité et la résistance de l'immeuble sous les efforts produits par les séismes ».

Les indications, sur les dispositions qui devaient être mises en œuvre pour que les immeubles résistent aux séismes, avaient été précisées par la circulaire du Service de l'Urbanisme et de la Construction en date du 2 avril 1973, amendée par celle du 28 octobre 1982.

Cette circulaire amendée faisait référence au Document Technique Unifié, dit « règles PS 69 » et addenda 82. Ces règles techniques spécifiques supposaient que les règles de calcul et de conception usuelles étaient respectées et ajoutaient des dispositions constructives supplémentaires.

Le calcul sismique a pour objectif la détermination de la réponse (c'est-à-dire les sollicitations, les contraintes, les déplacements ainsi que les déformations) d'un ouvrage à un mouvement tellurique sollicitant ses fondations.

La note de calcul détaillée devait ainsi préciser :

- les forces d'inertie développées par l'action sismique sur les éléments principaux de l'ossature : refends, cadres et portiques, encorbellements, etc.
- les équarrissages et les dispositions constructives (ferraillage notamment) qui en sont la conséquence.
- les dispositions projetées pour les fondations et l'exécution des niveaux sur un jeu de plans dressés par l'ingénieur conseil et approuvés par l'architecte.

Cette note permettait, avant le démarrage des travaux de construction d'un bâtiment, un contrôle du respect de la réglementation, des calculs et des plans d'exécution. Toute modification des plans en cours d'exécution, devait être approuvée. En outre était requise lors du récolement, une attestation signée par l'architecte et contresignée par l'ingénieur conseil confirmant que l'immeuble avait bien été réalisé conformément aux plans approuvés et qu'il présentait bien la résistance aux séismes conformément aux prescriptions de la circulaire.

La France a adopté depuis 1992 de nouvelles règles définies par le Document Technique Unifié dit « règles PS 92 », qui comporte les règles générales de conception et les modalités de calcul, permettant de mieux appréhender les efforts exercés par un séisme sur les bâtiments.

Les actions sismiques sont essentiellement définies par des accélérations. Ces dernières dépendent de la sismicité de la région considérée, de la nature du sol et du type de bâtiment à construire. Pour ce dernier critère, les valeurs sont d'autant plus importantes que la défaillance du bâtiment présente un risque plus élevé vis-à-vis du nombre de ses occupants, ou de son rôle dans la sécurité civile, la force publique ou le maintien de l'ordre public.

Le territoire Français a été divisé en cinq zones de sismicité croissante : 0, IA, IB, II, III. La totalité de l'arrondissement territorial de Nice est située en zone II.

Les bâtiments ont été répartis en quatre classes :

- classe A : les bâtiments dont la défaillance ne présente qu'un risque minime pour les personnes ou l'activité économique.
- classe B : les bâtiments dont la défaillance présente un risque moyen pour les personnes.
- classe C : les bâtiments dont la défaillance présente un risque élevé pour les personnes ou un risque en raison de leur importance socio-économique.
- classe D : les bâtiments dont le fonctionnement est primordial pour la sécurité civile, la force publique ou le maintien de l'ordre public.

Pour chacune des zones et des classes de bâtiments, des « accélérations nominales » supposées s'appliquer à un sol de référence, rocheux et plat, ont été fixées par la puissance publique.

Des spectres de dimensionnement permettent ensuite, en fonction de la nature du sol, des périodes de l'événement sismique et de la période propre des ouvrages, de déterminer les valeurs d'accélération à prendre en compte pour le calcul des dits ouvrages. S'il a été tenu

compte de la différence entre sol dur et sol mou, la connaissance du comportement spécifique de chaque sol du territoire français n'a pas été possible.

L'objectif de la Principauté en s'inspirant de ces nouvelles règles était de mieux prendre en considération sa situation géographique particulière, son territoire totalement urbanisé et la bonne connaissance de son sous-sol.

L'Arrêté Ministériel n° 2003-35 du 11 juin 2003 est conforme aux prescriptions des règles PS 92, pour ce qui concerne la fixation des classes de bâtiments, et de la zone de sismicité (Monaco étant en zone II comme tout le canton de Nice). Il en diffère essentiellement dans la fixation des accélérations nominales à prendre en compte pour les différents types de bâtiments et dans le choix des spectres normalisés (spectres élastiques et de dimensionnement) à prendre en compte en fonction des différents types de sol.

Par rapport aux données figurant dans les règles PS 92, les spécificités du texte sont les suivantes :

- les valeurs d'accélérations nominales sont inférieures ;
- les courbes de spectres normalisés décalées en abscisses et en ordonnées privilégient, même aux faibles périodes, les sols « durs » par rapport aux sols « mous » ;
- la prescription d'une valeur unique ($T = 1$) du coefficient d'amplification topographique, déjà contenu dans les spectres de dimensionnement correspondant à chaque zone, contre une valeur de 1 à 1,4.

Cependant dans les cas où la période propre du sol serait mesurée par une méthode expérimentale, le maître d'ouvrage peut remplacer alors les spectres normalisés par des spectres spécifiques adaptés à la nature exacte du sol rencontré.

Les dispositions sont applicables à tous les bâtiments nouveaux, dont la demande d'autorisation de construire est postérieure de plus de deux mois à la publication de l'arrêté. Pour certains bâtiments industriels la note jointe au dossier de permis de construire, établie en application des règles énoncées, doit être accompagnée d'une étude des dangers. Les bâtiments sont répartis en quatre classes selon leur taux d'occupation et leur degré d'importance stratégique en matière de risques.

Des mesures techniques préventives aggravantes sont prévues pour les bâtiments, équipements, installations industrielles présentant un risque spécial. En outre, des mesures complémentaires peuvent être imposées sur avis de la Commission Technique lorsque des modifications apportées à ces bâtiments existants accroissent le risque.

1.4.3.2. Sensibilisation de la population au risque sismique

Une population avertie peut contribuer à faire baisser le risque. Le gouvernement de Monaco a lancé deux actions pionnières destinées à sensibiliser et donc à préparer la population à faire face à l'événement sismique.

- le plan SESAM :

La Principauté de Monaco, membre de l'accord EUR-OPA Risques majeurs du Conseil de l'Europe, participe à différents programmes de cet accord et principalement au programme FORMOSE (formation à l'organisation des secours en milieu scolaire).

En Juin 1995, un comité interministériel décidait d'entreprendre une politique d'information du public visant à améliorer les capacités de réaction face à divers risques et notamment aux risques naturels. L'année 2003-2004 a été consacrée à l'élaboration d'un plan Sesam (Secours dans un Etablissement Scolaire face à un Accident Majeur) spécifique au risque sismique. Le personnel a été formé puis un plan plus « technique » a été monté (analyse du risque, comportements préventifs, évaluation des dégâts, prise de décision, rédaction du plan, information et entraînement des usagers). Des exercices de simulation sont depuis lors régulièrement effectués dans l'ensemble des établissements scolaires de la Principauté.

- le système d'alerte sismique de Monaco :

La conception du système d'alerte sismique répond à deux obligations. La première est d'informer la population le plus rapidement possible des caractéristiques d'une secousse ressentie. La deuxième est d'assurer une veille sismique instrumentale mais aussi psychologique en sensibilisant les autorités qui auront à gérer cette crise (inquiétude voire panique au sein de la population). Cette veille est assurée avec envoi automatique par messagerie électronique des caractéristiques des séismes, même éloignés, dont les ondes ont déclenché le système d'alerte sur Monaco. Ce système contribue également à l'alerte européenne du C.S.E.M. (Centre Sismologique Euro-Méditerranéen).

1.4.4. Conclusion sur l'approche du risque sismique à Monaco

La vulnérabilité de la Principauté de Monaco est donc importante. Elle est cependant réduite par une politique forte et des actions structurées en matière de constructions parasismiques, et ce depuis plus de 40 ans, ainsi que par des actions de sensibilisation des responsables politiques et des scolaires.

Même si l'impossibilité d'accéder à la totalité des paramètres constitue un obstacle sérieux à la description et à la modélisation précise des mouvements sismiques virtuels envisagés dans les études d'aléa (Betbeder-Matibet, 2003), nous pensons qu'il est important de préciser au mieux les paramètres de base qui dépendent d'une bonne connaissance de l'aléa afin de poursuivre dans le sens d'une baisse de la vulnérabilité.

L'objectif de cette étude, pluridisciplinaire et évolutive, est de préciser au mieux, à un instant donné, la connaissance de l'aléa sismique à Monaco. En effet, la diminution du risque dépend de la bonne application des règles parasismiques mais aussi d'une connaissance satisfaisante de l'aléa permettant aux décideurs de prendre des décisions en connaissance de cause.

2. Protocole d'analyse

Le protocole d'analyse retenu utilise quatre voies de recherche principales. Les différentes techniques employées permettent une approche complémentaire, à la fois multiscalaire et interactive, de l'aléa sismique du site de Monaco.

- Les techniques géomatiques les plus récentes et les techniques éprouvées de l'analyse structurale et microstructurale de terrain ont apporté d'utiles précisions quant au découpage crustal régional et local.
- L'utilisation des lois d'atténuation a conduit à une évaluation des vitesses et des accélérations maximales développées sur le site de Monaco par les principaux séismes historiques et instrumentaux.
- La qualification des effets de site a révélé des possibilités d'amplifications non négligeables du signal pour des parties bien délimitées du territoire monégasque.
- L'étude précise des dégâts sur le bâti monégasque engendrés par le séisme de 1887 a permis de définir une intensité macrosismique précise. Elle apporte des résultats significatifs sur la conjugaison effets de site – vétusté du bâti.

2.1. Techniques d'analyses géomatiques

L'approche géomatique de la fracturation crustale régionale et locale de la zone d'étude a été réalisée, dans un premier temps, suivant des critères d'analyses éprouvés pour des études sismiques (Goldsworthy et Jackson, 2000 ; Mondielli *et al.*, 2000 ; Meyer *et al.*, 2002), tectoniques (Arlegui et Soriano, 1998) ou hydrogéologiques (Kresic, 1995 ; Ivaldi et Ganoulis, 2003).

2.1.1. Les documents utilisés

- a) Dans le domaine terrestre, nous disposons de :
- Spaciocartes numériques Landsat 5 de 10 m de résolution avec l'ensemble des canaux disponibles pour une scène du secteur d'étude en été (23 juillet 1984) et une en hiver (6 février 1987).
 - Spaciocartes numériques orthorectifiées noir-blanc de 10 m de résolution SPOT view/SPOT S_0001 du 28/12/2000.
 - Le MNT à 1/25.000^e avec les données altimétriques de l'Institut Géographique National (I.G.N) issues de photogrammétrie au 60000^e ce qui correspond à une zone de 200 km² restituée sous forme de grille à pas de 50 m.
 - Le MNT à 1/5.000^e de Monaco associé avec le 1/25.000^e de l'I.G.N. sur une zone de 50 km² échantillonnée avec un pas de 10 m.
 - Deux MNT à 1/5.000^e réalisés à partir de deux triplets de photos aériennes de la mission IGN FD-06/250 de juin 1999 ont complété ces premiers traitements : secteur 1 (nord) près de Blausasc: photos 605, 606, 607 et secteur 2 (ouest) au nord-est de Peille : photos 628, 629, 630.

- b) Dans le domaine marin, nous disposons des données bathymétriques de l'IFREMER, SHOM et LHF qui après traitement ont été échantillonnées au pas de 50 m.
- Pour les données IFREMER, il s'agit des campagnes sonar de 1982, 1990 et 1991 entre Nice et Menton. Les lignes fournies sont : 62001111, 82001611, 90000111, 91003811, 91004111, 91004112. Pour cause de redondance les traitements ont été effectués uniquement sur les données 1990 et 1991. Ces données ont été maillées à pas de 50m (interpolation par algorithme de la tension minimum). Une maille de taille inférieure fait apparaître des artéfacts dus au processus d'acquisition sonar. Ces calculs ont été limités au polygone d'investigation des campagnes IFREMER.
 - Pour les données LHF, ce sont celles qui avaient été utilisées pour l'étude de la baie de Monaco et qui proviennent de la digitalisation des données du SHOM.

2.1.2. Les documents réalisés

Nous avons dressé une carte synthétique des structures linéaires visibles de l'échelle décamétrique à l'échelle plurikilométrique. La nature, l'orientation, la dimension et la fréquence des structures linéaires ont été précisées. Une première hiérarchisation des structures linéaires en linéaments, failles, diaclases a été réalisée. Des sites considérés comme sensibles en termes de paléotectonique et de tectonique active ont été individualisés sur la base du développement longitudinal des fractures, de leur fréquence, de leur diversité directionnelle, de leur agencement en carrefours tectoniques, de leur fraîcheur morphologique.

2.2. Etude de terrain

Nous avons effectué l'analyse de terrain dans un second temps en utilisant comme support de travail la carte de synthèse géomatique et la cartographie géologique disponible. L'étude structurale et microstructurale des sites, choisis en fonction de leur situation par rapport aux structures linéaires mises en évidence précédemment, a été menée avec les buts affichés suivants :

- effectuer un contrôle de validité des linéaments, failles, diaclases identifiés par analyse géomatique,
- hiérarchiser, à l'échelle des grandes unités géologiques régionales, les directions préférentielles de la fracturation,
- définir les champs de déformation fragile finie des roches, leurs liens avec les grands linéaments régionaux.

2.3. Analyse sismotectonique

L'analyse sismotectonique a été parallèlement réalisée en déterminant l'ensemble des séismes dans la zone d'étude définie précédemment qui présentent une magnitude suffisante pour le calcul de leurs mécanismes au foyer avec les objectifs suivants :

- déterminer les failles dont l'activité sismique ne fait aucun doute,
- définir les champs de contraintes actuels,
- préciser l'état de la contrainte actuelle de la région autour de Monaco.

2.4. Composition et utilisation du S.I.G.

Nous avons agencé l'ensemble des données géomatiques, de terrain et sismologiques sous la forme d'un Système d'Information Géographique (S.I.G.) référencé dans le système Français méridien de Paris sous la projection Lambert III sud.

a- Couches de base

- traitements des images Landsat été et hiver (Eosys),
- images SPOT (Spot),
- traitements MNT (Eosys),
- carte géologique numérisée (feuille Menton – Nice 1/50.000^e, Gèze, 1968),
- carte géologique numérisée (feuille de Nice : 1/250.000^e, Rouire, 1980),
- carte topographique IGN au 1/25.000^e, feuille Nice-Menton.

b- couches de travail

- alignements reconnus sur chacune des scènes traitées ou brutes (une couche par scène),
- alignements visibles sur l'ensemble des traitements ou images,
- banques de données sismologiques ReNaSS,
- paléochamps des déformations fragiles finies,
- champs et états de contraintes actuels.

2.5. Application des lois d'atténuation

La sismicité historique et instrumentale a été traitée au travers des principales lois d'atténuation permettant :

- de réaliser une hiérarchie des différents événements par rapport aux vitesses et aux accélérations mesurées ou calculées sur le territoire de la Principauté,
- d'évaluer les vitesses ou accélérations qui pourraient être atteintes à Monaco par les ondes issues d'une rupture sur l'un des principaux accidents mis en évidence.

2.6. Traitements de la sismicité instrumentale pour la détermination des effets de site

Les nouveaux enregistrements de la sismicité en divers points de la Principauté vont permettre de confirmer, d'infirmer ou de préciser les résultats de l'étude du microzonage de 1991. En effet, cette étude, réalisée sur un faible nombre d'événements exploitables, ne permettait pas de conclure de façon absolue (Duval, 1994).

Les méthodes classiques des rapports spectraux et des rapports H/V séismes sont appliquées aux séismes ayant présenté l'intensité la plus importante sur Monaco. Ces séismes sont situés à des distances variables de la Principauté : proches, tels les séismes de la crise de Blausasc

situés à moins de 10 km, lointains, tel celui de Boumerdès à 800 km et dont les ondes T ont été nettement ressenties par la population. Ces traitements ont pour buts affichés de :

- préciser les effets de site du plus grand terre-plein de la Principauté, celui du quartier de Fontvieille, en essayant d'évaluer une modification de ces effets en fonction de la distance et de l'azimut,
- s'assurer si le Rocher de Monaco est le meilleur site de référence sur le territoire de la Principauté, tel que défini dans le microzonage de 1991.

2.7. Etude macrosismique du séisme de 1887

L'exploitation des archives du Palais princier concernant le séisme du 23 février 1887 et plus particulièrement tous les rapports concernant les dégâts occasionnés au bâti permettent de :

- réaliser une carte des dommages,
- préciser l'intensité macrosismique,
- définir les facteurs aggravants : âge du bâti et effets de site.

2.8. Discussion sur l'aléa tsunami

La description des différents types de tsunamis qui pourraient atteindre Monaco et l'exploitation de l'enregistrement du microtsunami du 21 mai 2003 vont permettre de discuter l'hypothèse d'un tsunami majeur sur la Principauté.

CHAPITRE 2 : ETAT DES CONNAISSANCES EN MATIERE DE PALEOTECTONIQUE ET DE TECTONIQUE ACTIVE REGIONALES ET LOCALES

1. Paléotectonique

1.1. Structure générale de l'arc de Nice et de ses abords

1.1.1. Présentation géographique et structurale

La région d'étude centrée sur Monaco couvre la partie la plus méridionale de l'arc alpin occidental, ainsi qu'une petite partie de la marge septentrionale du bassin liguro-provençal.

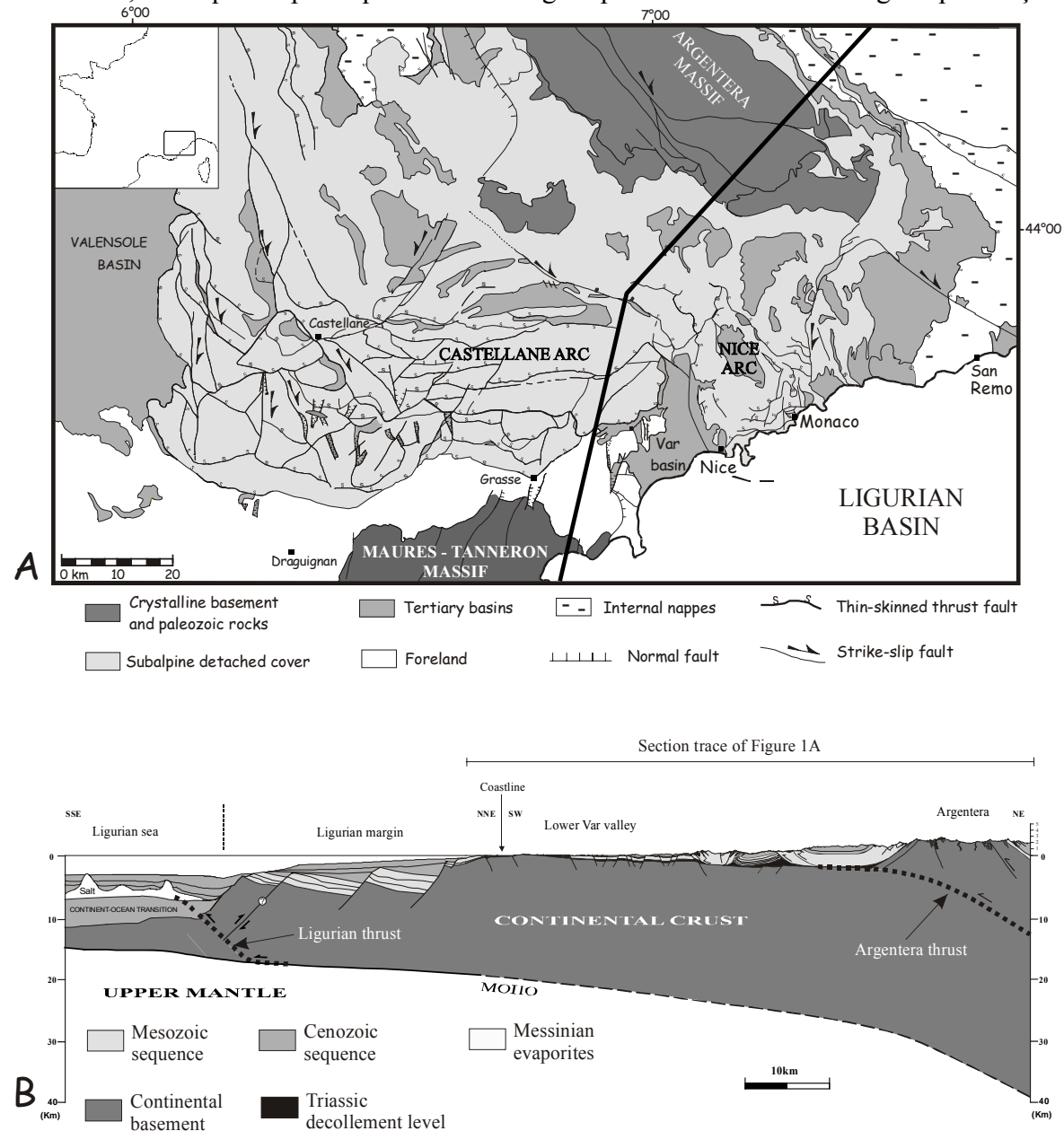


Figure 3 : Carte structurale (A) et coupe à l'échelle crustale (B) de la jonction entre les Alpes du sud et le bassin Ligure (d'après Laurent, 1998).

Chapitre 2 : Etat des connaissances

Elle concerne donc une chaîne de montagnes -les Alpes occidentales- et un bassin océanisé en partie au moins, le bassin liguro-provençal (Figure 3). Cette position explique la complexité morphologique, tectonique et sismique de cette région. Ce domaine alpin externe dessine une suite d'arcs dont les ampleurs vont en diminuant du nord au sud tandis qu'augmentent leur courbures (Gèze, 1960).

Monaco est situé dans l'arc de Nice (Figure 4) qui est le dernier et le plus petit des arcs subalpins, développé sur 30 km du nord au sud, sur 15 km d'est en ouest. Cet arc comprend une couverture mésozoïque et cénozoïque décollée de son substratum (Gèze, 1963).

L'arc de Nice appartient au domaine frontal de l'arc alpin occidental. Il est limité :

- Au sud par la marge passive du bassin océanique ligure. La branche méridionale de l'arc de Nice est orientée globalement E-O et comprend un empilement d'écailles chevauchantes vers le sud ou le sud-ouest (Gèze, 1963).
- Au nord, par un passage progressif depuis la bordure sédimentaire du massif cristallin de l'Argentera-Mercantour où les plis et les failles ont une direction dominante E-O, jusqu'aux plis et aux failles dont l'incurvation indique l'appartenance aux éléments les plus internes de l'arc (Gèze, 1960).
- A l'ouest par la basse vallée du Var et la vallée de la Vésubie. Cette branche occidentale est limitée par l'accident dextre N20-N40 de la Vésubie et prolongée par l'accident décrochevauchant dextre N-S St Blaise – Aspremont. Ce segment présente des reliefs qui atteignent 1143m au Féron et 1504m à la cime de Rocca Seira.
- A l'est par le faisceau de failles Breil-Sospel-Monaco qui le sépare des unités de la Roya caractérisées par des grands plis de direction NNO-SSE. Cette branche orientale formée d'unités chevauchantes N130-N150, à vergence sud-ouest est limitée à l'est par le décrochement senestre, N0-N10, Breil-Sospel-Monaco (Gèze 1963, Bulard *et al.*, 1975). Cet accident qui a pu jouer le rôle de rampe latérale (Perez, 1975) se poursuit avec une orientation N30-N40, le long du diapir triasique de Sospel et de la terminaison périclinale du tégument de la vallée de la Roya (Laurent, 1998). Ce segment oriental de l'arc de Nice comprend une série d'unités chevauchantes dont les sommets sont le mont Agel qui culmine à 1143 m et qui se trouve être le point haut du bassin versant de Monaco et en allant vers le Nord, le Pic du Baudon à 1264m et le mont Méras à 1243m.

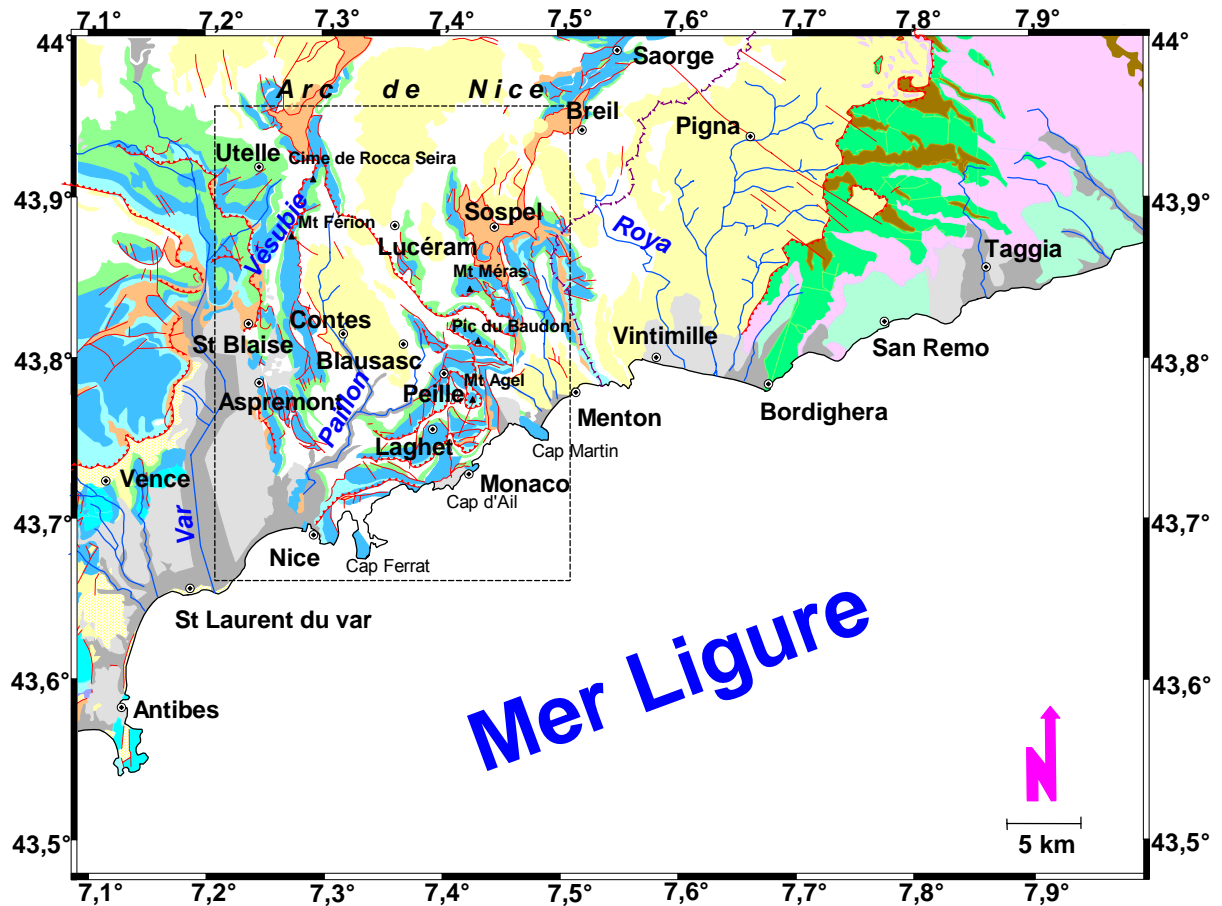


Figure 4 : Localisation des limites de l'arc de Nice sur fond de carte géologique au 1/250.000° pour la zone d'étude sismotectonique autour de Monaco.

Cet arc de Nice a été étudié par différents auteurs dans les domaines de la tectonique et microtectonique, de la géodésie et de la sismologie. La connaissance de sa structure et de son évolution passée et actuelle est indispensable pour la bonne compréhension de l'agencement et du fonctionnement des failles au pouvoir sismogène qui le composent.

1.1.2. Histoire tectonique de la région

L'activité tectonique alpine de la région étudiée s'étale sur 250 millions d'années, du début du Trias à l'époque actuelle.

L'ouverture de l'océan Tethys a débuté par un rifting au niveau des Alpes au **Lias** (Dardeau, 1988). Les événements tectoniques qui lui ont succédé ont été caractérisés par une extension majeure entre l'Afrique et l'Europe. Cette extension s'est traduite par une marge découpée en blocs basculés vers le sud-ouest, associés à des failles E-O à NO-SE (Dardeau, 1987) ou à une extension synrift nord-ouest sud-est marquée par des failles NE-SO (Lemoine *et al.*, 2000). Des failles synsédimentaires montrent que l'extension s'est poursuivie jusqu'au **Crétacé inférieur** (Dardeau, 1987) période au cours de laquelle l'ouverture téthysienne se termine (Lemoine *et al.* 2000). L'orogénèse alpine débute alors au Crétacé supérieur avec la remontée de la plaque africaine (Lemoine *et al.*, 2000).

C'est à l'**Eocène** que la plaque africaine rentre en contact avec la plaque européenne au niveau de l'Apulie. Cet affrontement provoque la flexuration de la plaque européenne (Jolivet *et al.*, 2000) qui est associée à une subsidence importante responsable d'importants dépôts sédimentaires tertiaires dans les Alpes.

Au cours de l'**Oligocène** la remontée de la plaque africaine est freinée par sa collision avec la plaque arabo-eurasienne. Ceci a impliqué une période d'extension de la Méditerranée occidentale qui s'est traduite par la formation de nombreux bassins dont le Liguro-provençal (Jolivet, 2000). C'est à cette époque que se forment les plis NO-SE comme l'anticlinal de Cap Martin (Gèze, 1963), le synclinal de Contes (Perez, 1975) et l'anticlinal du Férion (Campredon, 1973). Toutes ces structures ont pu se mettre en place sous l'influence d'une compression de direction NE-SO antérieur au régime de compression subméridien **miocène** (Gèze, 1960 et 1963 ; Perez, 1975 ; Ritz 1986 et 1991)

Le **Miocène inférieur** est marqué par le début de la structuration des massifs cristallins externes et des chaînes subalpines. C'est à cette époque que la mise en place de l'arc de Nice débute. Cette phase est mise en évidence par la discordance importante des poudingues burdigaliens de Roquebrune (Gèze, 1960) ; plus précisément, sur la base des marnes datées du Miocène inférieur discordantes sur l'anticlinal du Cap martin. Le début de la structuration de l'arc de Nice se situe à l'**Oligocène-aquitainien** (Perez, 1975 ; Bulard *et al.*, 1975) et est contemporain du volcanisme de Cap d'Ail. Le paroxysme de la structuration de l'arc de Nice se situe au **Miocène terminal** (Gèze, 1960 ; Perez, 1975 ; Bulard *et al.*, 1975) et donne à l'arc de Nice son architecture principale. La crise **messinienne**, événement eustatique et climatique majeur, modifie fortement la morphologie et la sédimentation sur tout le pourtour du bassin méditerranéen (Clauzon, 1999).

La couverture a subi une compression ENE-OSO jusqu'à la limite du **Miocène et de l'Oligo-aquitainien**, puis une compression N30 à N-S jusqu'au **Pliocène moyen** comme le montre la déformation des conglomérats pliocènes (Campredon *et al.*, 1977). Elle subit ensuite une compression NNO-SSE au Plio-quatenaire (Ritz, 1992). Une déformation Pliocène est mise en évidence par le rejeu décrochant de l'accident de « St Blaise-Aspremont » (Schroetter, 1997). De même une activité **plio-quatenaire** est décrite pour la faille de Peille-Laghet (Rebaï, 1987). C'est un champ de contraintes en éventail à l'intérieur de l'arc de Nice qui est mis en évidence par Ritz (1992). Ces études tectoniques montrent donc une variation de l'axe de compression autour de la direction N-S dans l'arc de Nice au Plio-quatenaire.

Cet héritage structural à la fois varisque et alpin se manifeste entre autres par le décalage de la couverture par rapport à son socle qui peut être expliqué par la succession de deux phases shistogènes.

- La shistogénèse affectant le tégument de l'Argentera a été parallélisé avec les événements tectorogéniques post-priaboniens et anté-aquitainiens de la couverture comme les plis à axe NO-SE de l'arc de Nice, tels ceux du Cap Martin (Guardia et Ivaldi, 1985).

- Le soulèvement relatif de la bordure externe du massif accompagne la deuxième shistogénèse. Le décollement de la couverture de l'arc de Nice serait intervenu à la fin du premier serrage méso-alpin.

La couverture décollée a subi au cours de l'ère Cénozoïque, une déformation souple importante. Socle, tégument et couverture sont parcourus par d'importants couloirs linéamentaires suivant des directions hercyniennes remobilisées à l'Alpin (Ivaldi *et al.*, 1991).

1.2. Découpage crustal régional des Alpes maritimes franco-italiennes

Nous parlerons dans ce découpage, de linéaments tectoniques comme étant des familles de failles qui s'agencent en couloir de largeur hectométrique à plurihectométrique sur des distances plurikilométriques.

L'héritage structural à la fois varisque et alpin se manifeste :

- par la superposition de formations de socles et de formations sédimentaires de couverture parautochtone ou nappée, séparées par des évaporites triasiques,
- par le plissement et le déplacement de la couverture par rapport à son socle avec un différentiel de raccourcissement moyen entre le substratum et la couverture de l'ordre de 3 km (Guardia *et al.*, 1985),
- par un découpage linéamentaire tronçonnant à l'emporte-pièce le socle et les couvertures.

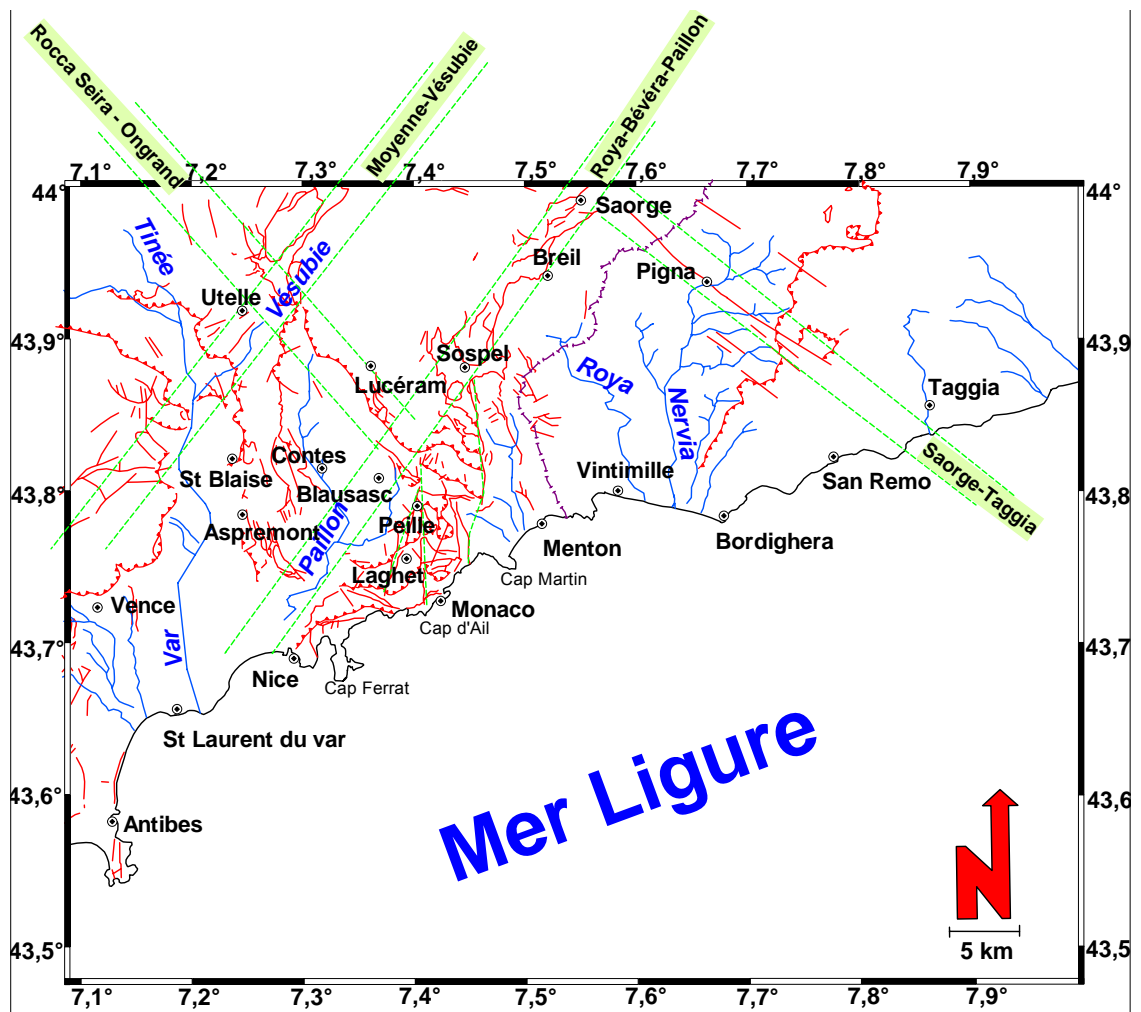


Figure 5 : Les grands couloirs de failles et les accidents sur fond de carte géologique au 1/250.000^e pour la zone d'étude sismotectonique autour de Monaco.

Dans les Alpes maritimes franco-italiennes, la déformation des roches est étroitement tributaire de cet héritage tectonique régional et s'organise autour de 4 directions structurantes majeures : N40°E, N90°E, N120-140°E, N160-170°E. Ces directions ont influencé de façon permanente, à toutes les époques, la sédimentation et les déformations alpines régionales (Guardia et Ivaldi, 1996). Les principales familles directionnelles d'accidents régionaux actuellement reconnus sont :

1.2.1. Accidents bordiers subméridiens décrochevauchants Est et Ouest de l'arc de Nice

Ils sont respectivement situés dans la zone « Sospel – Roquebrune – Cap-Martin » et en bordure Est de la vallée du Var. Ils limitent, dans la zone étudiée, les plis et chevauchements de l'arc de Nice.

1.2.2. Les accidents de la famille linéamentaire N 40° E

Ils correspondent à des directions cévenoles, lesquelles sont soulignées par des alignements du trias diapirique (Guardia et Ivaldi, 1996). Les accidents de la moyenne Vésubie et de la Roya – Bévéra – Paillon appartiennent à cette famille linéamentaire (Figure 5).

- Le linéament Roya – Bévéra – Paillon

Sur ce linéament se greffe, à partir de Sospel, un faisceau d'accidents N-S en relais, atteignant la côte entre Monaco et le Cap Martin d'une part et Cap d'Ail d'autre part (Guardia et Ivaldi, 1996); Le principal est l'accident de Monaco-Sospel-Breil, quelquefois prolongé jusqu'à Saorge (Madeddu, 1996 ; Larroque *et al.*, 2001). Cet accident de « Monaco-Sospel-Breil » correspond en surface à un faisceau de petites failles qui s'organisent suivant une direction principale NNE-SSO et qui serait couplé au Sud à l'accident de « Peille-Laghet » (Ritz, 1991).

- Le linéament de la moyenne Vésubie

De Belvédère il se prolonge vers le SO en direction de Grasse où il est jalonné par le Trias de l'Estéron, de la Cagnes et du Loup (Guardia et Ivaldi, 1996). Un des accidents principaux est le décrochement NNE-SSO de « Vésubie-Mont Férion » qui pourrait avoir son prolongement assuré par le décrochevauchement dextre N-S de « Saint Blaise-Aspremont (Larroque *et al.*, 2001). Ce décrochement peut être considéré comme la frontière géologique entre l'arc de Castellane et l'arc de Nice (Ritz, 1992 ; Madeddu, 1996). Le déplacement vers le SSO des unités chevauchantes de l'arc de Nice aurait été favorisé par les jeux décrochants, dextres de l'accident de « Vésubie-Mont Férion » et senestres de l'accident de « Monaco-Sospel-Saorge », faisant office de rampes latérales.

1.2.3. La famille linéamentaire N120-140° E

Elle comprend le chevauchement Rocca-Seira – Ongrand et le décrochement Saorge – Taggia qui est en continuité avec l'important accident de Ferrière – Molières – Saint-Martin-Vésubie qui affecte le socle. Situé au delà des confins Est de l'arc de Nice, l'accident de Saorge – Taggia recoupe les sédiments tertiaires à secondaires. Son âge de mise en place est Plio-Quaternaire (Ritz, 1991). Le faisceau de « Saorge-Taggia » est connecté avec le faisceau décrochant N30-40°E de « Monaco-Sospel-Breil » (Figure 5).

1.2.4. Les directions E-O

Elles sont mises en évidence à toutes les époques géologiques depuis le Permien. Elles ont surtout été observées au Nord du site de la zone d'étude régionale avec une série de failles globalement E-O au niveau de la bordure méridionale du massif cristallin de l'Argentera Mercantour (Gèze, 1960), notamment une zone décrochante plurikilométrique courant de la région de Belvédère à celle de Carmo Gerbontina (Guardia et Ivaldi, 1996). Sans l'identifier, Larroque *et al.* (2001) montrent l'utilité d'une telle faille pour l'équilibre cinématique de la région (Figure 14). Ce linéament E-O correspond à une zone de faiblesse de la croûte continentale régionale dont le jeu a induit, à diverses époques géologiques, de fortes subsidences dans les bassins sédimentaires installés à son aplomb. Ainsi au Paléogène le fonctionnement de ce linéament engendre l'accumulation de plus de 1000 m de sédiments dans un contexte de déformation compressive (Ivaldi *et al.*, 1986).

1.3. Découpage crustal local du site de Monaco

Le territoire de la Principauté de Monaco est partie intégrante de la zone externe, méridionale, de l'arc alpin occidental en limite de la marge septentrionale du bassin liguro-provençal. Il se situe dans une position centrale de la bordure méridionale de l'arc de Nice.

La Principauté de Monaco se situe au front sud de l'arc de Nice. L'architecture du site est commandée par un empilement d'écaillés à vergence sud découpées par des failles de directions variées et par un corps magmatique effusif calco-alcalin dont les âges isotopiques caractérisent le Chattien et le Burdigalien (Ivaldi *et al.*, 2003). Le corps magmatique est représenté en surface et sub-surface par des pyroclastites s'étendant entre Monaco et Cap d'Ail (Figure 6).

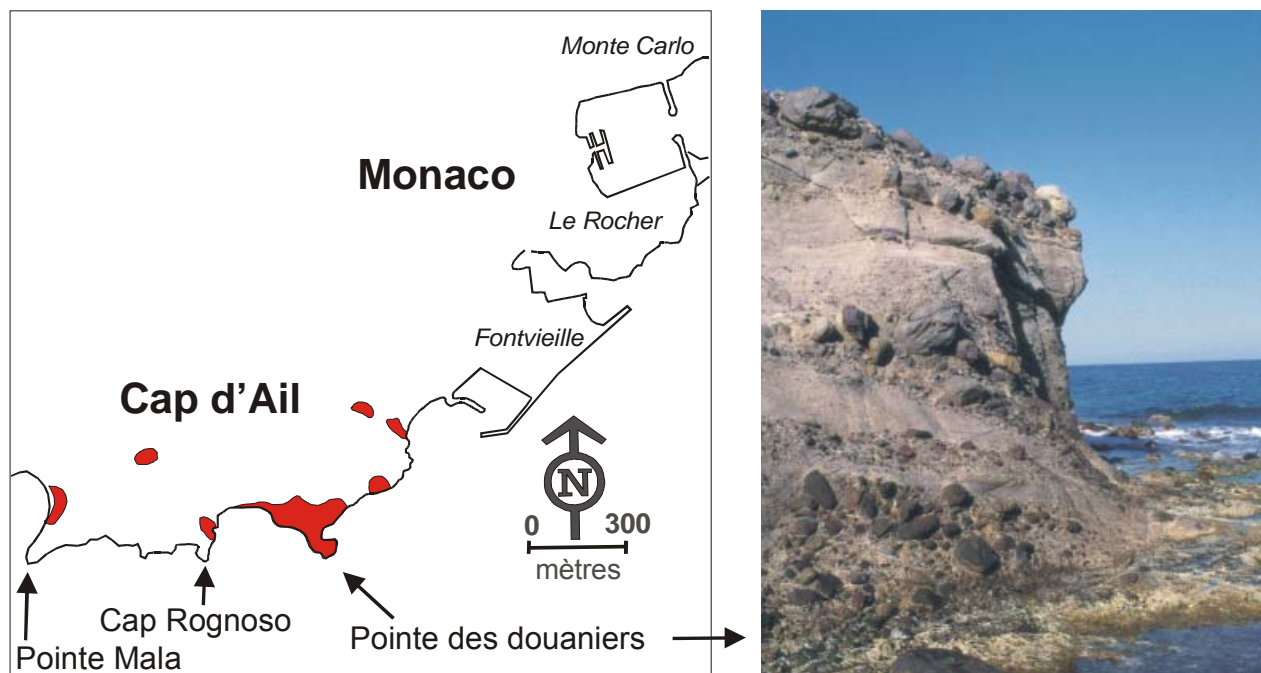


Figure 6 : Localisation géographique du corps magmatique effusif de Cap d'Ail visible en surface à la frontière ouest de Monaco (Gèze, 1968).

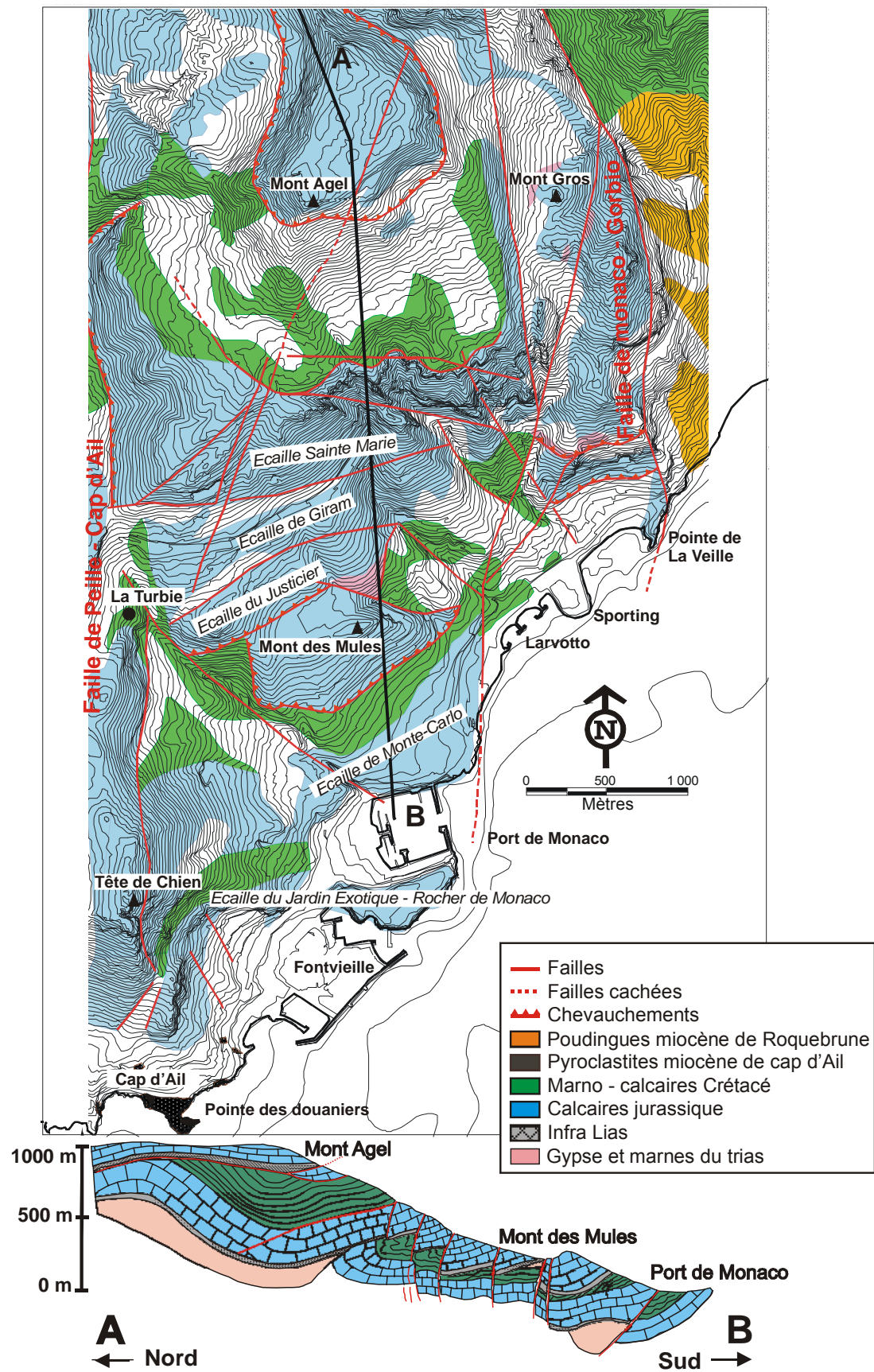


Figure 7: Carte et coupe géologique NS du bassin versant de Monaco.

Le territoire de la Principauté est structuré par deux de ces écaïlles : au Nord l'unité de Monte Carlo et au Sud celle de Monaco – Jardin Exotique. L'une des originalités de cette architecture est un enracinement frontal des écaïlles (Gèze, 1960, 1963).

Le site de Monaco est entouré par l'extrémité terrestre méridionale de deux grandes fractures Nord – Sud :

- à l'Ouest de la Principauté la faille Cap d'Ail – Peille ;
- à l'Est de la Principauté la faille de Monaco – Gorbio qui pourrait être reliée à celle de S^{te}- Agnès – Sospel.

2. La géodésie

La dynamique de la déformation active des Alpes occidentales est actuellement due à la convergence entre les plaques africaine et eurasiatique. Cette vitesse de convergence avait été estimée dans un premier temps à 6,2 +/- 0,5 mm par an suivant une direction 163°N +/- 9° à la longitude des Alpes occidentales (Demets *et al.* , 1994). Grâce à des nouvelles mesures géodésiques elle a ensuite été revue à la baisse de 30% à 60% suivant une direction 120 à 170°N vers l'ouest (Nocquet et Calais, 2003).

Au niveau des Alpes Occidentales, le régime de déformation est différent entre le domaine interne (à l'est du front pennique) de la partie centrale des Alpes Occidentales qui est caractérisé par une extension est-ouest, et l'ensemble des Alpes du Sud - Provence, où se manifeste une compression nord-sud à nord ouest- sud est (Calais *et al.*, 2001).

Les dernières mesures ne montrent pas un taux de déformation significatif entre le bloc corso-sarde et les Alpes occidentales (Nocquet et Calais, 2003), l'essentiel de la contrainte due à la convergence Afrique-Europe se répartissant plus au sud le long de la côte maghrébine.

3. Tectonique active

3.1. Sismicité des Alpes maritimes franco-italiennes

Les Alpes maritimes franco-italiennes sont régulièrement touchées par des séismes de magnitude faible à modérée (Figure 8). Le plus important est le séisme Ligure du 23 février 1887 d'une magnitude estimée à 6.4 (Ferrari, 1991). Durant ces 50 dernières années, seul celui du 19 juillet 1963 a atteint la magnitude de 6 (Bossolaco et Eva, 1965). Plus récemment les deux plus importants sont ceux du 21 avril 1995 de magnitude 4.7 (Courboulex *et al.*, 1998) et du 25 février 2001 de magnitude 4.5 (Courboulex *et al.*, 2002).

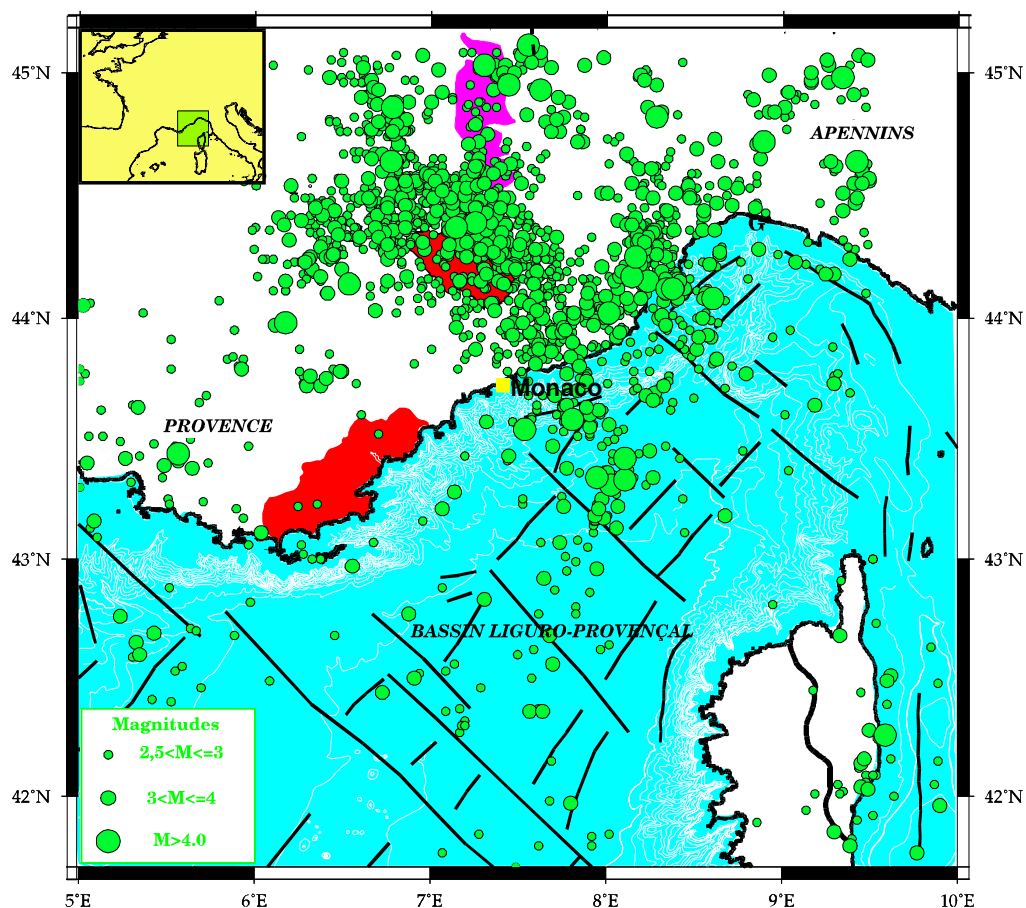


Figure 8: Sismicité de 1970 à 1993 des Alpes sud – occidentales, de la Provence et du bassin Liguro-provençal, catalogue de sismicité L.D.G. / C.E.A, magnitudes > 2.5 (Madeddu, 1997).

3.1.1. Sismicité historique

La sismicité historique comprend tous les séismes majeurs qui n'ont pas été mesurés mais qui sont connus par leurs effets notables sur le bâti et/ou sur la population. Dans notre région, les archives les plus anciennes référençant des séismes remontent à 1494, soit un peu plus de 500 ans. C'est à peu près à cette date que des registres sont tenus par le clergé ou par des notaires. Des noms de villes touchées par les séismes y étaient notés et ont permis de localiser des zones de dommages maximum.

Les dégâts, les victimes et les cartes isoséistes de l'ensemble des séismes historiques sont traités en **annexe 1**. Seul le séisme du 23 février 1887, le plus récent et le mieux connu est décrit ici. Les dégâts qu'il a occasionnés sur le bâti monégasque seront développés dans le **chapitre 6**.

Les six séismes principaux pour Monaco (Figure 9), classés ci-dessous chronologiquement, ont été déterminés par le calcul à partir de la localisation et de l'intensité tirées de la base de données Sisfrance 2003 (Lambert, 2003). La détermination de ces séismes est développée au **chapitre 5**. Soulignons que les données sources sont imprécises ou incertaines et que les distances et les magnitudes sont données ici à titre indicatif.

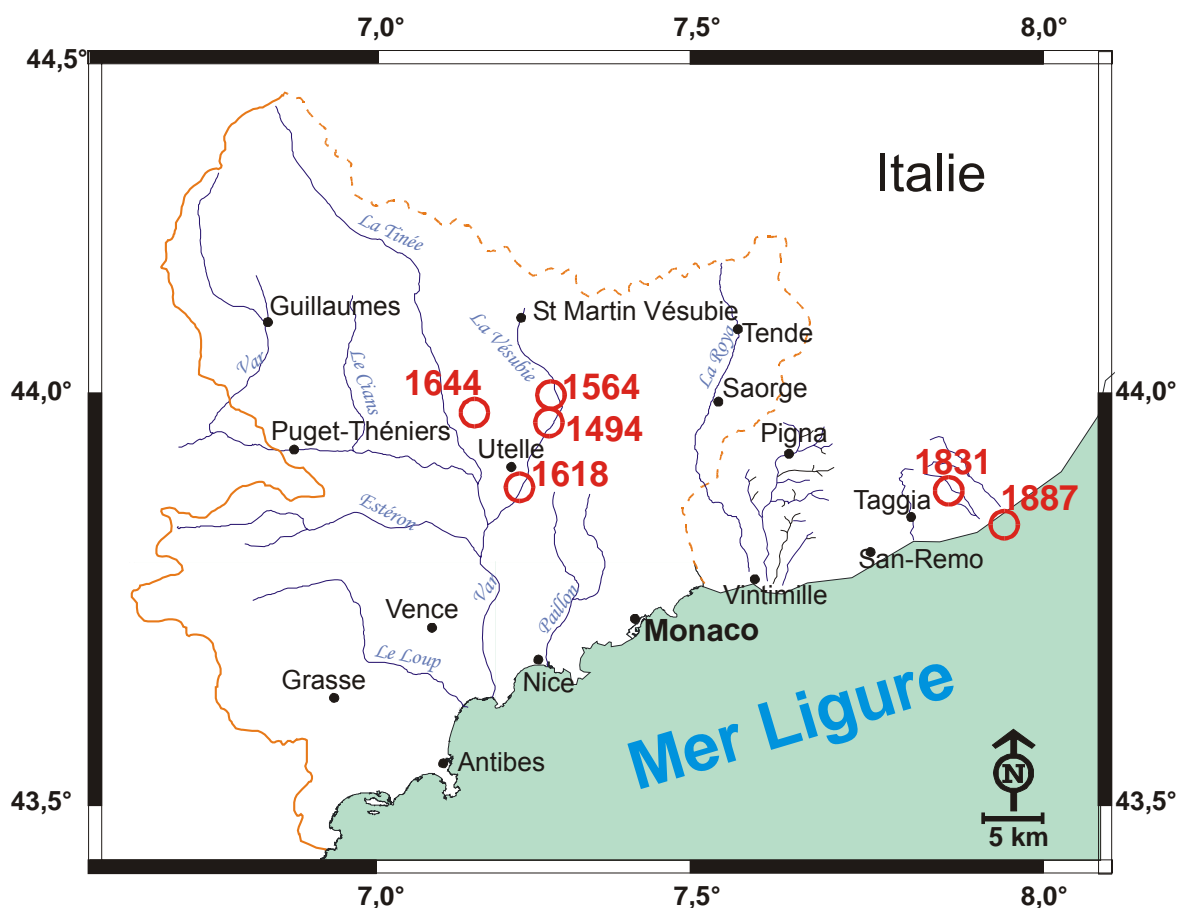


Figure 9 : Principaux séismes historiques dans les Alpes maritimes et la proche Ligurie

- le 23 juin 1494, 31 km de Monaco, M = 5.5
- le 20 juillet 1564, 33 km de Monaco, M = 5.5
- le 18 janvier 1618, 23 km de Monaco, M = 5.5
- le 15 février 1644, 34 km de Monaco, M = 5.5
- le 26 mai 1831, 40 km de Monaco, M = 5.5
- le 23 février 1887, 64 km de Monaco, M = 6

Lors du séisme Ligure du 23 février 1887 (Figure 10), les victimes et les dégâts furent importants sur la Riviera italienne. On dénombra la mort de 640 personnes. Le 23 février 1887 est le jour des cendres, à cette époque les fidèles allaient prendre les cendres à l'église avant le travail. La moitié des victimes ont péri dans 4 églises seulement (220 victimes à Baiardo, 53 à Bussana, de 30 à 40 à Castellaro et 2 à Vallecrosia). Si cet événement avait eu lieu à une autre heure le bilan aurait été beaucoup moins lourd (Comm. orale Laurenti, 2005).

Dans les Alpes-Maritimes on dénombra 8 victimes (Laurenti, 1998).

- Castillon : 2 morts et 20 blessés
- La Bollène-Vésubie : 2 morts et 15 blessés
- Bar sur Loup : 2 morts et 3 blessés
- Nice : 2 morts et 13 blessés.

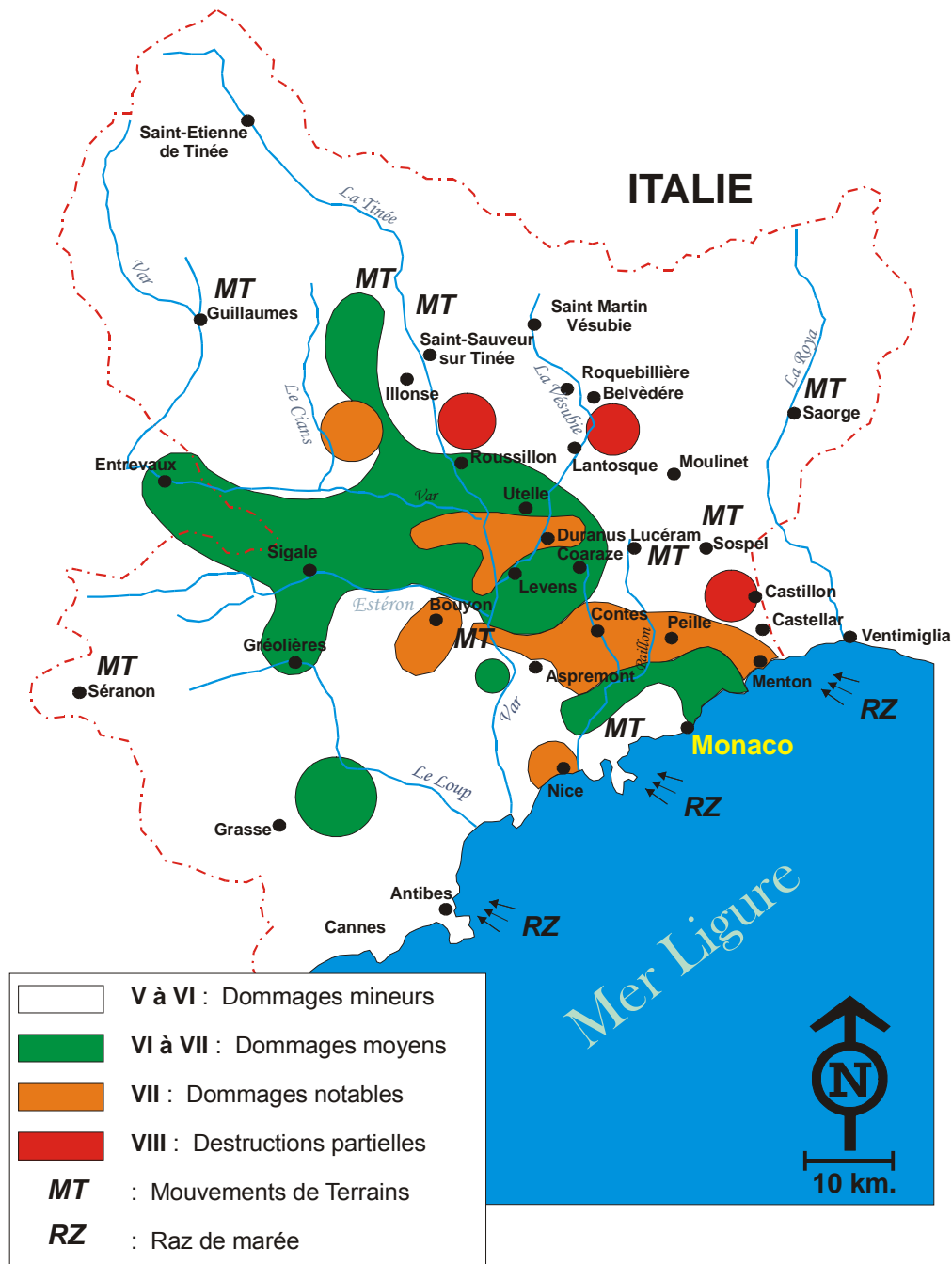


Figure 10 : Carte des zones de dommages du séisme du 23 février 1887 dans les Alpes-Maritimes (Laurenti, 1998).

L'intensité macrosismique n'a jamais été évaluée à Monaco et nous nous proposons de le faire dans le chapitre 6 de cette étude. Toutefois au niveau de Roquebrune et de Menton cette intensité est évaluée entre VII et VIII par Ferrari (1991) et à VI-VII par Laurenti (1998).

A Nice et à Menton ce sont les quartiers situés en bordure de cours d'eau sur des terrains alluvionnaires qui ont subi les dégâts les plus notables. « De nombreux bouleversements de terrain ont eu lieu sur la côte comme à l'intérieur des terres. La montagne du Barbonnet au-dessus de Sospel fut fendue sur toute sa hauteur par des fissures perpendiculaires au nord magnétique. Elles étaient de 3 mm au Col Saint Jean et 1 cm aux lacets les plus hauts » (Ministère de la guerre, 1887).

Tous ces séismes ont « épargné » la vie des habitants de Monaco et de sa proche région. Au niveau matériel il est difficile d'affirmer que le séisme de 1887 a été le plus destructeur. C'est en effet le séisme majeur le plus récent, donc celui que nous connaissons le mieux grâce aux nombreuses archives.

Concernant la sismicité historique, à Monaco, seul le séisme Ligure de 1887 est très bien connu au niveau de ses effets (voir **chapitre 6**). Les séismes « majeurs » antérieurs à celui de 1887, n'ont curieusement laissé aucune trace dans les archives ecclésiastiques ou dans celles du Palais (Communication orale de C. Passet). Pourtant deux événements au XVI^{ème} siècle auraient pu concourir à offrir un terrain favorable à la notification des séismes et de leurs effets sur la population ou sur les habitations : d'une part, la reconstruction presque totale de la ville après le siège de 1507 et d'autre part, l'obligation de tenir des registres de catholicité dans les églises (concile de Trente 1545 – 1563). Le curé Pacchiero notait scrupuleusement les événements de tout ordre de 1639 à 1657, le séisme de 1644 par exemple n'y figure pas. Il est probable depuis 1507 que les secousses sismiques de l'arrière pays (1564, 1618, 1644, 1831) n'aient pas généré des dégâts notables sur les constructions monégasques et ne méritaient pas à ce titre d'être mentionnées dans les archives. Même si ces manifestations naturelles n'avaient pas d'incidences directes sur le niveau de vie des habitants de l'époque comme l'aurait été une sécheresse ou un orage de grêle anéantissant des récoltes, elles auraient du effrayé la population. Ces événements auraient alors pu être interprétés comme un châtement divin et être ainsi relatés dans les archives.

3.1.2. Sismicité instrumentale

Depuis 1920, ce sont 80 séismes de magnitude comprise entre 4 et 6 qui ont affecté les Alpes sud-occidentales et le bassin liguro-provençal (Larroque *et al.*, 2001), sans qu'aucun de ces séismes n'ait engendré de dégâts matériels significatifs. Nous présentons dans le tableau ci-dessous, la liste des séismes de magnitudes supérieures à 3.5 depuis 1963 (Tableau 2) et leur localisation géographique (Figure 11). La magnitude 6, la plus importante, a été atteinte lors du séisme du 19 juillet 1963 (Bossolasco *et al.*, 1972). Ce séisme a été localisé à une centaine de kilomètres au sud de Monaco. Il a été ressenti dans la totalité des Alpes-Maritimes, à Marseille, à Turin et aussi en Corse. A Menton, localité la plus touchée, on nota juste quelques bris de vitres.

date	M	lat	Long	D epi	az
19/07/1963	6,0	44,33	8,11	102,32	49
05/09/1963	4,2	44,65	8,23	137,02	41
13/03/1965	3,7	44,07	7,18	47,15	326
07/04/1966	4,4	44,12	7,39	44,56	356
18/04/1968	4,5	43,95	8,13	82,92	72
22/11/1969	3,6	44,38	6,63	114,37	310
30/12/1970	3,5	44,2	8,28	109,42	61
31/12/1970	4,2	44,16	8,28	107,33	63
01/02/1971	4,3	44,43	7,41	78,89	359
06/06/1971	4,2	44,66	6,68	132,91	322
15/08/1971	3,8	44,85	6,76	145,39	330
18/01/1972	4,6	44,11	8,3	106,94	66
08/02/1974	4,3	44,15	6,48	114,84	295
06/02/1977	4,0	44,49	7,34	86,01	354

date	M	lat	Long	D epi	az
03/03/1977	4,0	44,69	6,69	134,88	323
05/01/1980	5,3	44,98	7,47	140,10	2
10/10/1980	4,3	44,45	7,15	86,47	340
22/04/1981	4,5	43,31	8,23	100,86	117
20/03/1983	4,1	44,34	6,48	125,10	303
19/06/1984	4,3	44,05	6,15	145,78	285
30/06/1984	4,1	44,05	6,13	147,93	284
04/10/1985	4,1	43,63	8,09	75,11	98
01/05/1986	3,9	43,43	7,45	32,39	174
26/12/1989	4,5	43,483	7,561	30,64	149
15/04/1990	4,3	43,574	7,774	42,54	112
21/04/1995	4,7	43,8155	7,5563	18,49	55
24/02/1997	4,1	43,7	8,5	120,01	91
26/06/1997	3,8	43,9	7,2	31,58	309
10/10/1997	4,5	42,2	6,6	191,88	208
11/11/1997	4,0	44,1	7,9	68,02	52
07/07/1999	3,9	44,64	6,81	122,64	326
21/08/2000	5,0	44,89	8,28	161,32	36
08/09/2000	3,5	44,81	8,27	153,57	38
25/02/2001	4,5	43,49	7,47	26,15	168
14/03/2001	3,8	43,5	7,94	62,73	113
18/07/2001	4,1	44,85	8,33	161,19	39
20/10/2002	3,5	42,03	6,28	226,48	214

Tableau 2 : Séismes récents de magnitude >3.5 entre 1963 et 2005, enregistrés à la jonction des Alpes du Sud et du bassin ligure entre les latitudes 42° et 45°N et les longitudes 6 à $8,5^{\circ}\text{E}$ (Nicolas *et al.*, 1998, Larroque *et al.*, 2001, base de données BCSF), avec leur magnitude, leur distance épacentrale et leur azimut par rapport à Monaco.

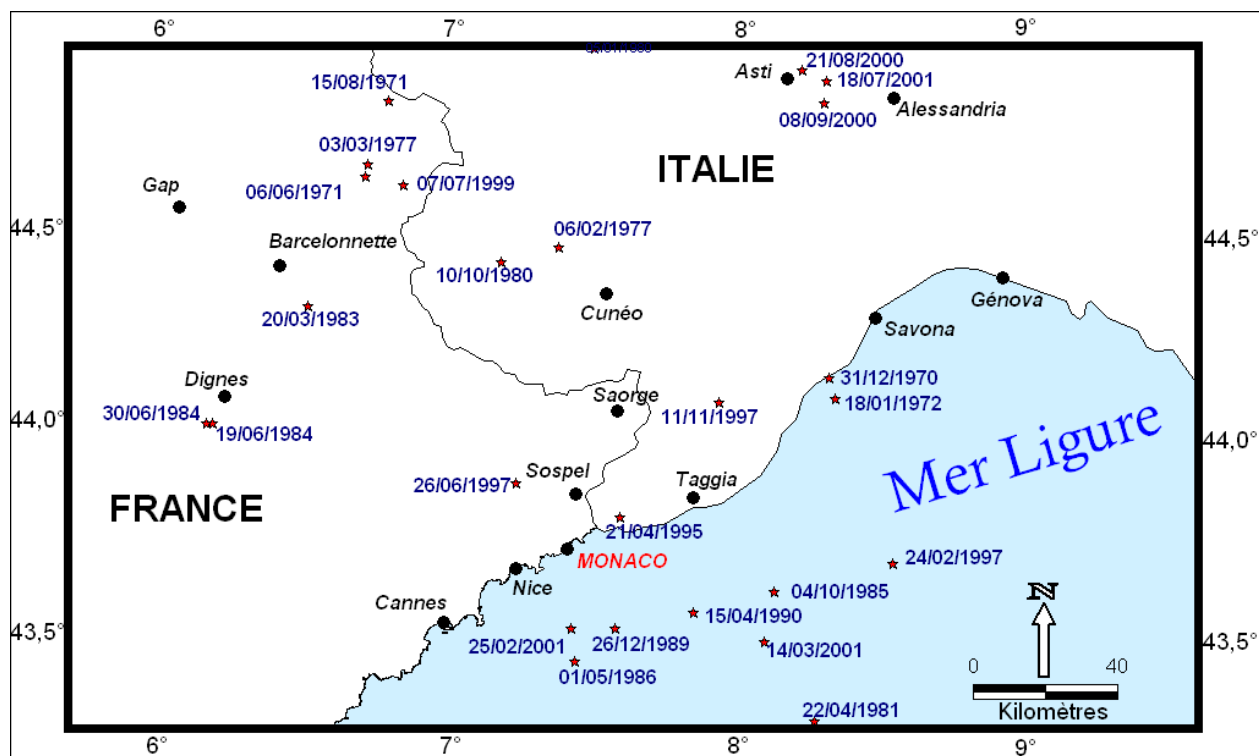


Figure 11 : Séismes des 50 dernières années de magnitude > 3.5 depuis 1963 jusqu'au 21 février 2005, enregistrés à la jonction des Alpes du Sud et du bassin ligure - latitudes $43,3^{\circ}$ et 45°N - et - longitudes 6 à $8,5^{\circ}\text{E}$ - (données Réness).

3.1.3. Sismicité et tectonique

3.1.3.1. Corrélations entre sismicité et accidents tectoniques

Dans certaines zones situées à la jonction des Alpes du sud et du bassin ligure il existe une corrélation entre les alignements des séismes et les intersections linéamentaires (Guardia *et al.*, 1996) ou les failles reconnues sur le terrain (Larroque *et al.*, 2001). Cette corrélation entre la sismicité et les principaux accidents peut se représenter de deux manières :

- En fonction des principaux accidents reconnus dans la déformation fragile finie (Gèze, 1968) et suspectés d'activités récentes (Figure 12).

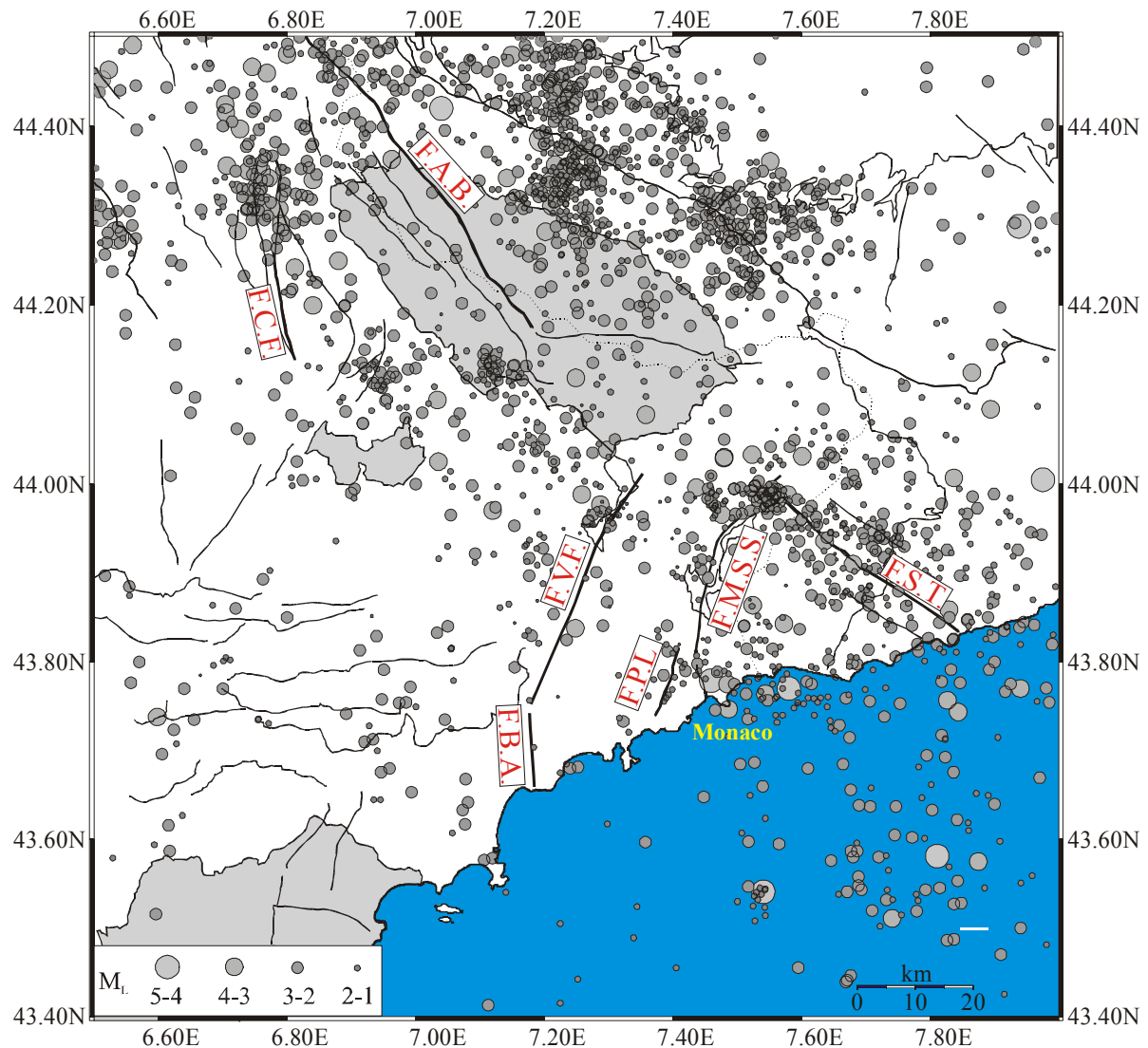


Figure 12 : Relation entre les principaux accidents et la sismicité instrumentale dans les Alpes maritimes franco-italiennes et les régions limitrophes entre 1980 et 1999 (Larroque *et al.*, 2001) : F.B.A : Faille Saint Blaise Aspremont, F.V.F : Faille Vésubie-Mt Féron, F.P.L : Faille Peille-Laghet, F.M.S.S. : Faille Monaco-Sospel-Saorge, F.S.T : Faille Saorge-Taggia, F.A.B : Faille Argentera-Mercantour, F.C.F : Faille Camp des fourches.

- En fonction des grands linéaments mis en évidence par l'analyse tectonique et microtectonique et notamment les couloirs N40° et N120-140°E. Guardia et Ivaldi (1996) considèrent que les accidents connus ne représentent qu'une petite partie de ces linéaments. Ils étudient cette corrélation avec les grandes directions linéamentaires plus représentatives de la structure de la région (Figure 13).

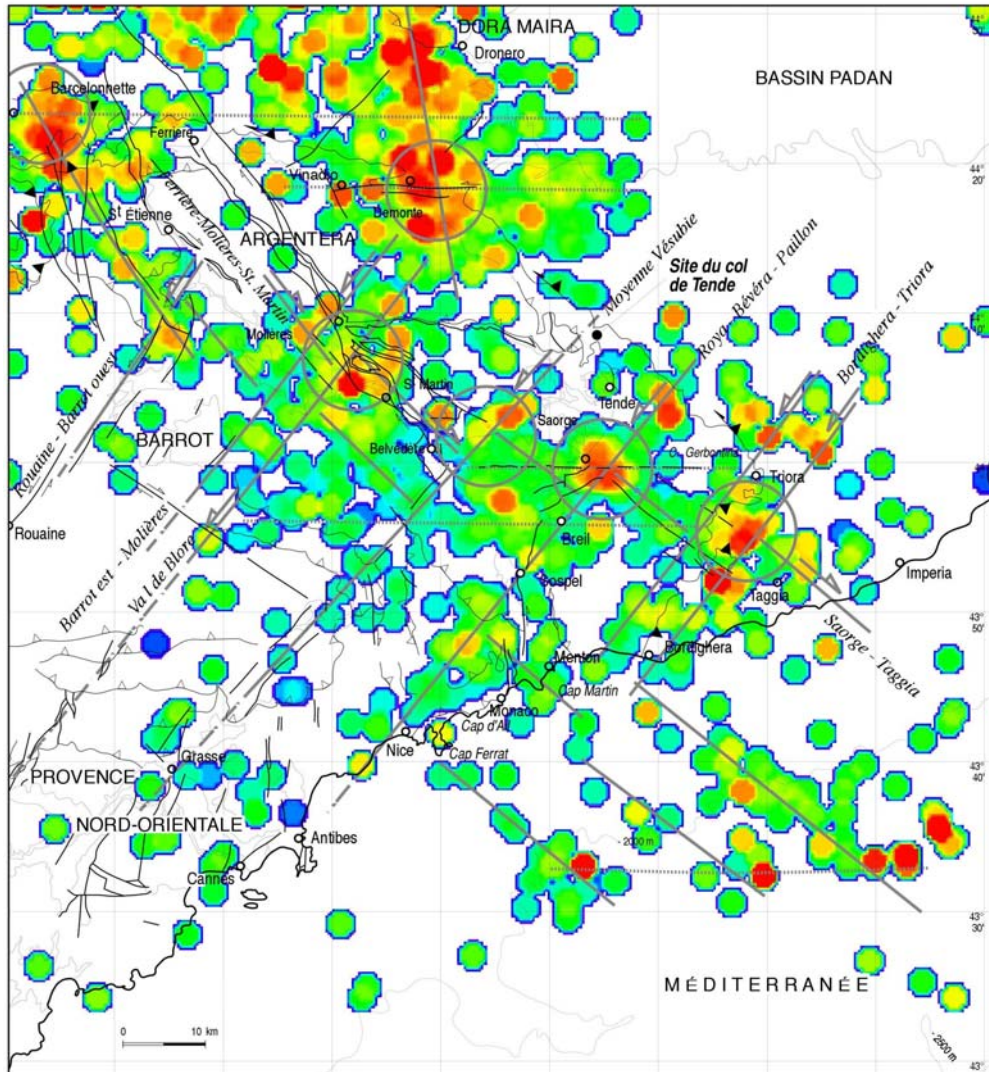


Figure 13: Carte des magnitudes virtuelles déduites de l'énergie cumulée, sur des aires de 6 km², de la sismicité des Alpes maritimes franco-italiennes et des régions limitrophes entre 1977 et 1992. La magnitude virtuelle la moins élevée est représentée en bleu, vert, jaune puis rouge pour la plus élevée (Guardia *et al.*, 1996).

Cette carte des magnitudes virtuelles a été réalisée de la manière suivante : la magnitude de chaque épocentre est transformée en énergie (Gutenberg et Richter, 1956). Ces énergies sont cumulées par aire de 6 km². L'énergie cumulée est retransformée en magnitude virtuelle par surface. Ceci permet de représenter plus fidèlement l'activité d'une aire de 6 km² en gommant l'incertitude sur la localisation évaluée à +/- 3 km par Guardia et Ivaldi (1996). Cette incertitude est confirmée dans notre étude par le calcul de la moyenne des distances séparant la position des séismes relocalisés et publiés par rapport à leurs localisations initiales. Nous

pensons que cette représentation est donc plus fidèle et mieux adaptée à l'interprétation de la corrélation entre la sismicité et les accidents de la région.

Ainsi ces aires de magnitude virtuelle soulignent les couloirs linéamentaires et les zones dans lesquelles ils se croisent et qui présentent une intense activité. Tant à terre qu'en mer, la sismicité des Alpes maritimes franco-italiennes de ces dernières décennies est le reflet actuel de l'héritage tectonique. La sismicité est notamment élevée le long des principaux linéaments N120-140°E, N40°E, et N160-170°E et plus encore au niveau de leurs intersections (Guardia et Ivaldi, 1996).

3.1.3.2. Principales failles actives connues autour de Monaco dans l'arc de Nice

3.1.3.2.1. Généralités sur les failles actives reconnues dans la région

Les failles actives reconnues à la jonction du bassin ligure et des Alpes maritimes franco-italiennes et des régions limitrophes (Figure 14 et Tableau 3) sont au nombre de 11 (Larroque *et al.*, 2001).

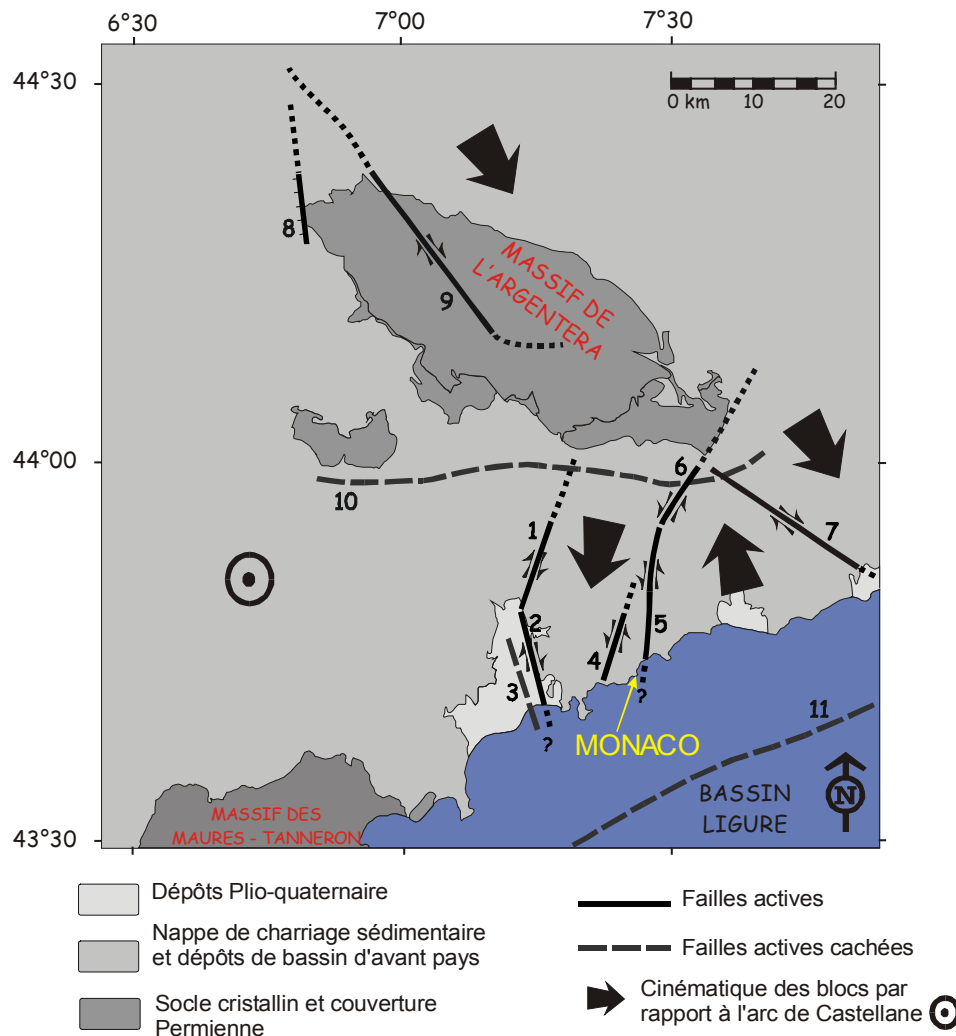


Figure 14 : Carte des failles actives de la jonction du bassin Ligure et des Alpes maritimes franco-italiennes et de ses régions limitrophes (Larroque *et al.*, 2001).

Nom de la faille	orientation	jeu	Longueur (km)	Sismicité historique	Sismicité instrumentale	Indice de terrain
1- Vésubie–Mont Férion	N20°E	Dextroinverse	20	oui	basse	a*
2- St Blaise-Aspremont	N175°E	Dextroinverse	15	non	non	a*
3- Basse vallée du Var	N175°E	inverse	-	-	-	b*
4- Peille-Laghet	N20°E	senestre	10-18	non	basse	c*
5- Monaco-Sospel	N10°E	senestre	20	non	modérée	-
6- Sospel-Saorge	N40°E	senestre	40	non	modérée	-
7- Saorge-Taggia	N130°E	senestre	40	oui	modérée	escarpements
8- Camp des Fourches	N165°E	normal	20	oui	modérée	-
9- Argentera-Bersezio	N140°E	senestre	70	oui	basse	escarpements
10- Faille de l'Argentera	N90°E	inverse	-	-	basse	-
11- Faille ligure	N70°E	inverse	-	oui	modérée	-

a : remontée verticale des conglomérats pliocènes du Var ; b : décalage vertical des terrasses du Var ; c : cassures transversales des brèches Plio-Quaternaires .

Tableau 3 : Géométrie, jeu et sismicité des 11 failles actives reconnues (d'après Larroque *et al.*, 2001)

Trois failles, sismiquement actives au moins dans certains de leurs tronçons, encadrent la Principauté :

- à l'Ouest la branche orientale de la faille de Peille (Peille - Cap d'Ail) qui appartient à la même famille que celle de Peille-Laghet,
- à l'Est la faille de Monaco-Sospel qui se prolonge jusqu'à Saorge,
- au Sud, ce que Larroque *et al.* (2001) nomment la faille ligure et qui représente en fait une zone de faiblesse mal déterminée et localisée approximativement au pied du talus.

La sismicité instrumentale est modérée pour l'ensemble de ces failles.

3.1.3.2.2. *Activité sismique dans la zone de la faille de Peille-Laghet ou faille de Blausasc*

L'épicentre du petit séisme de Peille du 1^{er} novembre 1999 de magnitude 3.4 a été localisé dans la commune de Blausasc à une latitude de 43,805°N et une longitude de 7,362°E pour une profondeur de 1,5 à 4,5 km. Il présente un mécanisme au foyer décrochant senestre compatible avec une réactivation de la faille de Peille-Laghet située non loin (Courboux *et al.*, 2001).

La crise sismique de Blausasc a eu son maximum d'intensité les 19-20 et 21 décembre 2001 avec une secousse principale le 19 décembre à 14h20 qui a atteint une magnitude de 3.4. Dans le cadre de la campagne SALAM plus de 200 microséismes (Figure 16) ont été localisés grâce à un réseau dense d'une quarantaine de stations sismologiques parmi lesquelles deux stations monégasques MONA et MONR (Figure 15).

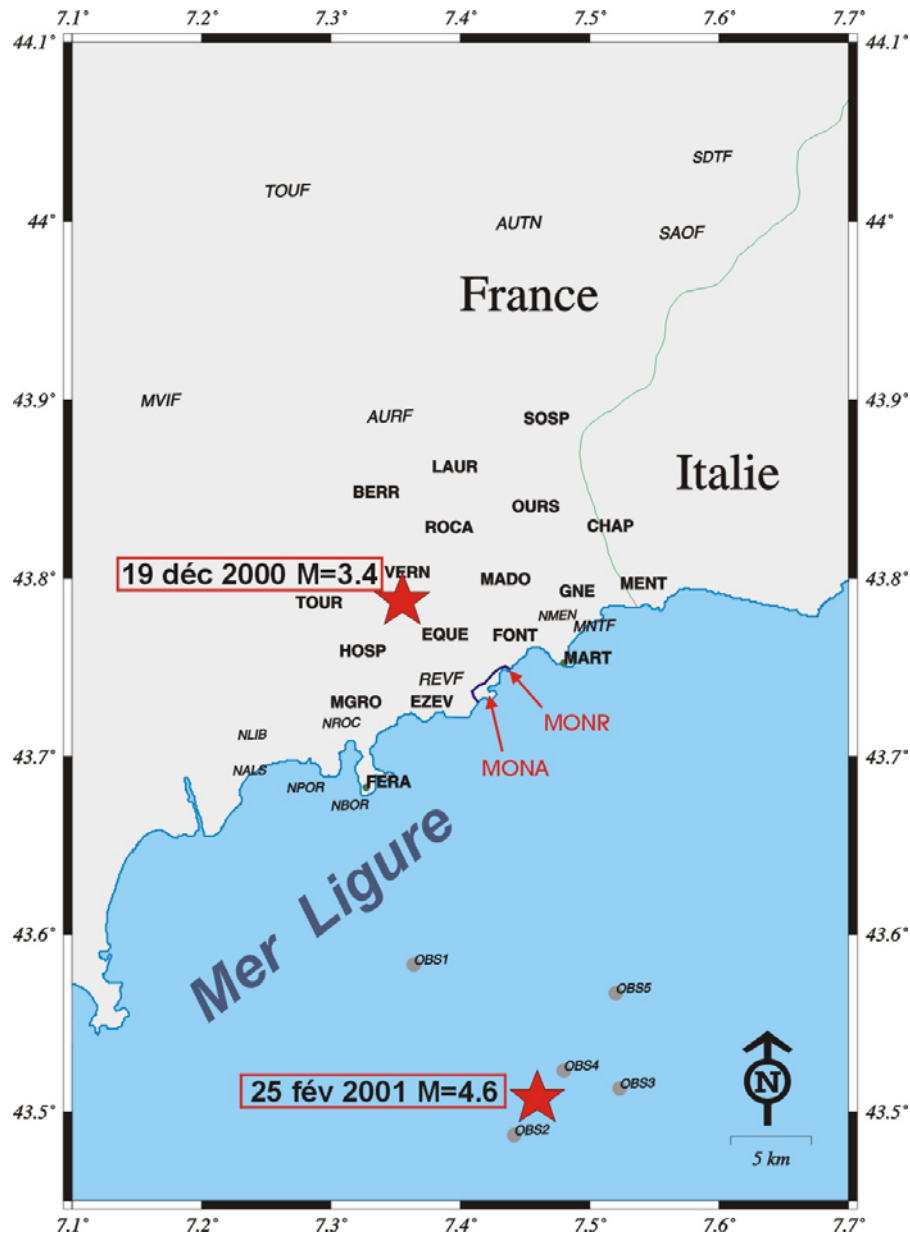


Figure 15 : Réseau des stations sismologiques permanentes et temporaires lors de la campagne SALAM (octobre 2000 à Avril 2001) avec localisation des deux principaux séismes enregistrés. Les stations monégasques MONA et MONR sont installées respectivement sur le Rocher et dans le vallon Saint Roman. Les stations marines (OBS) ont été installées du 27 février au 25 mars 2001.

Plusieurs alignements sismiques ont été mis en évidence (Figure 16) :

- une famille de 19 événements, (3 en novembre, et 16 les 19 et 20 décembre) qui s'alignent sur une direction N110°E (Gelis, 2002 ; Courboux *et al.*, 2005). Trois de ces mécanismes au foyer ont comme solutions focales un décrochement sénestre sur un plan de direction N20°E et un autre dextre sur un plan de direction N110°E. La direction générale de l'alignement de ces séismes permet de choisir le plan de faille de direction N110°E (Gelis, 2002).
- une autre famille comprend 8 séismes (nuit du 18 au 19 décembre, de 23h51 à 01h03). Ils sont disposés dans une ellipse de 1000 m de longueur dans la direction E-O et de 500 mètres de largeur dans la direction NS. Le mécanisme au foyer composite présente deux

plans nodaux avec un décrochement dextre sur le plan de direction N110°E et un autre sénestre sur le plan d'azimut N20° et de pendage 70°, identique à la déformation fragile finie de la faille de Peille-Laghet. Le plan nodal N20°E est en accord avec le principal alignement sismique, le second plan nodal N110°E est en accord avec la direction mise en évidence par l'alignement des séismes principaux du 19 et 20 décembre 2000.

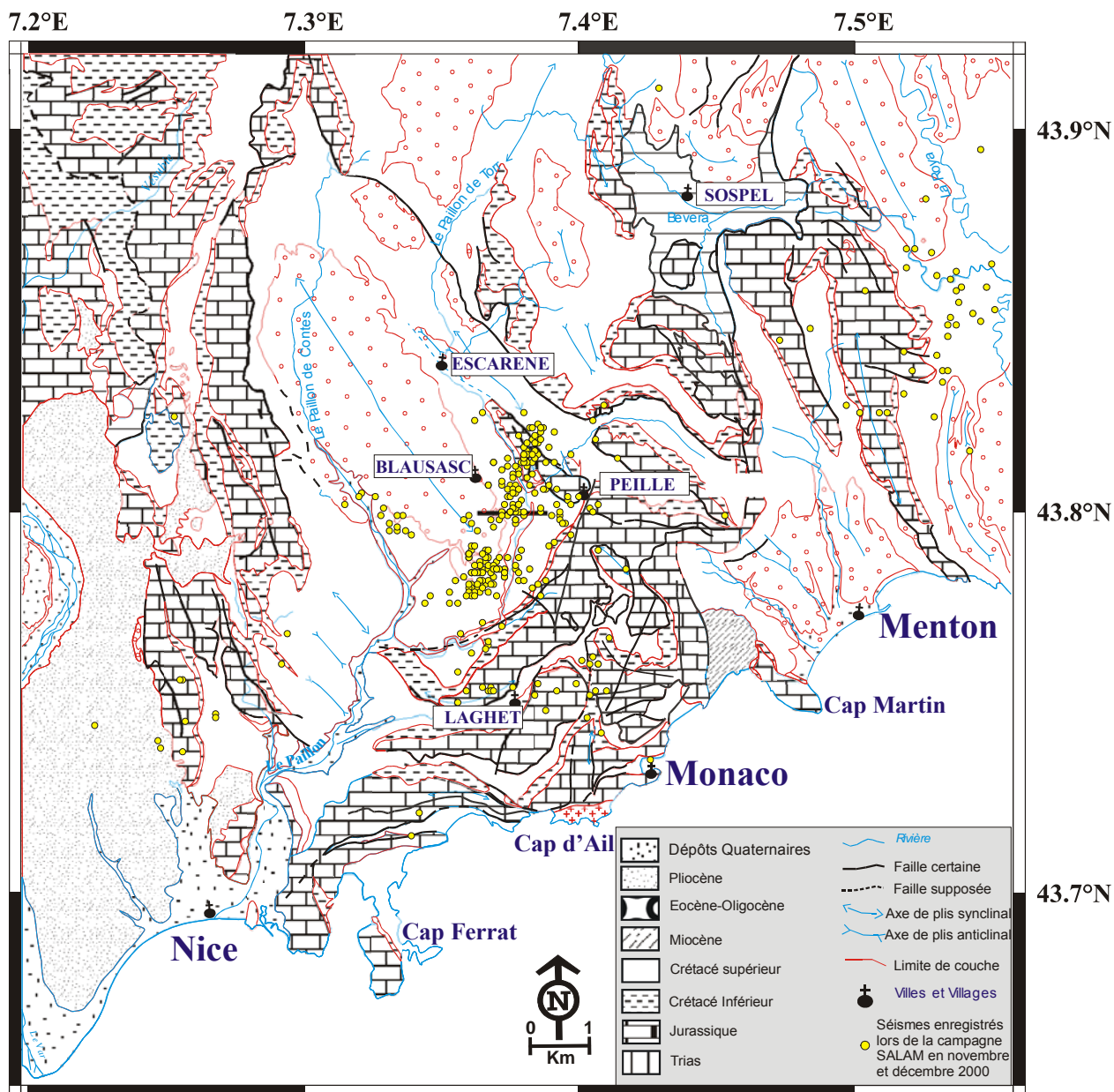


Figure 16 : Séismes de la crise de Blausasc situés dans le contexte géologique et structural de la région (Charreau, 2002).

Cette faille N20°E dite de Blausasc est éloignée de 2 km du tracé de la faille de Peille-Laghet, les événements de cette crise localisés dans la croûte se situent probablement au niveau d'une paléofaille normale dont l'équivalence dans la couverture paraît être la faille de Peille-Laghet (Charreau, 2002 ; Courboux, 2003). D'après la reconstitution cinématique, cette faille se situait dans sa position initiale relativement proche des séismes, la partie substratum de cette faille n'ayant pas été déplacée lors du glissement de la couverture par la mise en place de l'arc de Nice (Charreau, 2002). Durant la crise sismique, cette faille a joué de 3 à 0,5 km de

profondeur. Elle correspond en surface à la morphologie de la vallée du Paillon qui est orientée N20°E (Courboux *et al.*, 2003).

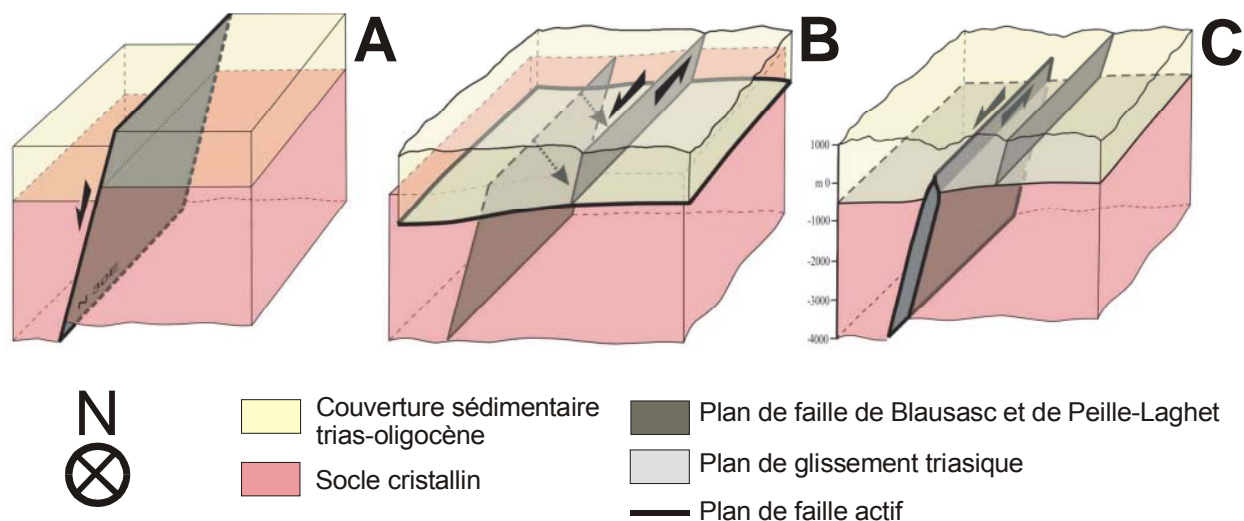


Figure 17 : Schémas tectoniques de l'évolution de la faille de Blausasc du Crétacé jusqu'à l'actuel. A : faille en extension au Crétacé ; B : déformation de la couche superficielle au Miocène, articulation entre l'accident N170°E sur le décollement basal et la faille décrochante senestre sur l'accident Peille - Laghet dans la couverture sédimentaire ; C : réactivation actuelle de la partie profonde de la faille sans propagation de la rupture en surface (Courboux *et al.*, 2005).

Courboux *et al.* (2003) proposent l'évolution suivante pour expliquer l'actuelle sismicité de cette faille (Figure 17). Au Miocène, la compression tectonique agit sur une faible épaisseur et on assiste à un enfoncement marqué de la couverture sédimentaire dans la partie sud. Durant cette période, la faille héritée de Peille – Laghet avait été réactivée. La partie de la faille visible, qui affecte la couverture sédimentaire, a été séparée de sa base et réactivée par un décrochement senestre. La crise sismique du 19-20 décembre 2000 est une réactivation de la partie profonde de la faille.

Une petite faille conjuguée N110°E (moins de 600 m de long), aurait été activée durant cette crise. En surface aucune trace d'une structure active de direction ONO – ESE n'a été observée. Toutefois une succession de miroirs striés de cette direction sont présents entre Contes et Peillon et un accident N130°E qui pourrait être son prolongement est coupé et fléchi à Peillon par la faille de Peille-Laghet (Gèze, 1968). La sismicité et ces indices géologiques confirment donc l'existence d'une petite faille active à jeu décrochant dextre entre Contes et Peillon.

Durant cette crise sismique, la faille de Blausasc (N20°E) a été activée sur une longueur d'environ 6 km. Si cette faille rompait en une seule fois sur une longueur d'environ 6 km, l'événement résultant serait de magnitude 5.5 (Courboux *et al.*, 2005).

Cette crise a mis en évidence des directions N20°E et N110°E qui présentent des mécanismes décrochants compatibles avec une direction de raccourcissement subméridienne (Calais *et al.*, 2000 ; Larroque *et al.*, 2001) et un champ de contrainte σ_1 NS au Plio-Quaternaire (Ritz, 1992).

3.1.3.2.3. Activité sismique dans la zone de la faille Monaco-Sospel et de celle de Sospel-Saorge

Entre la fin du mois d'octobre 1983 et le mois de janvier 1984, la crise sismique de la moyenne vallée de la Roya centrée entre Fontan et Saorge signe l'activité de cette faille. L'activité sismique a débuté le 13 octobre 1983 par trois secousses dans la région de Sospel avant de se concentrer dans la partie la plus septentrionale de cet accident (Hoang-Trong *et al.*, 1987). Une soixantaine de séismes de magnitude inférieure à 2.5 et quatre de magnitude d'environ 3 ont été enregistrés au niveau du nœud tectonique présent à l'intersection des failles de Monaco-Sospel- Saorge et de celles de Saorge-Taggia.

Dans la solution focale commune à tous les séismes étudiés, c'est le plan nodal N110°E qui a été retenu, parce que les hypocentres s'alignent sur une direction N110°E, qui de plus a été reconnue sur photo satellite (Hoang Trong *et al.* 1987).

Le mécanisme tectonique dans ce secteur est très proche de la solution focale calculée par Hoang Trong *et al.* (1987) lors de cette crise sismique (Ritz, 1992).

Dans une recherche de corrélations visuelles entre la distribution épacentrale et les accidents géologiques connus, la sismicité relative à l'amas le plus dense se répartit principalement le long du segment nord de l'accident Saorge-Taggia (Madeddu, 1997). Le faisceau d'accidents de Monaco – Sospel - Saorge est beaucoup moins marqué par la sismicité, excepté dans sa terminaison nord, mais les événements observés peuvent aussi correspondre à la faille de Saorge - Taggia dans l'hypothèse où celle-ci se prolonge vers le nord-ouest (Madeddu, 1997). Si cet accident de Saorge - Taggia ne se prolongeait pas vers le nord, sa connection avec celui de Monaco – Sospel - Breil se réaliserait par l'intermédiaire de failles N70-N100°E à pendage vers le sud (Figure 18) en jouant principalement en chevauchement (Cosani, 1996).

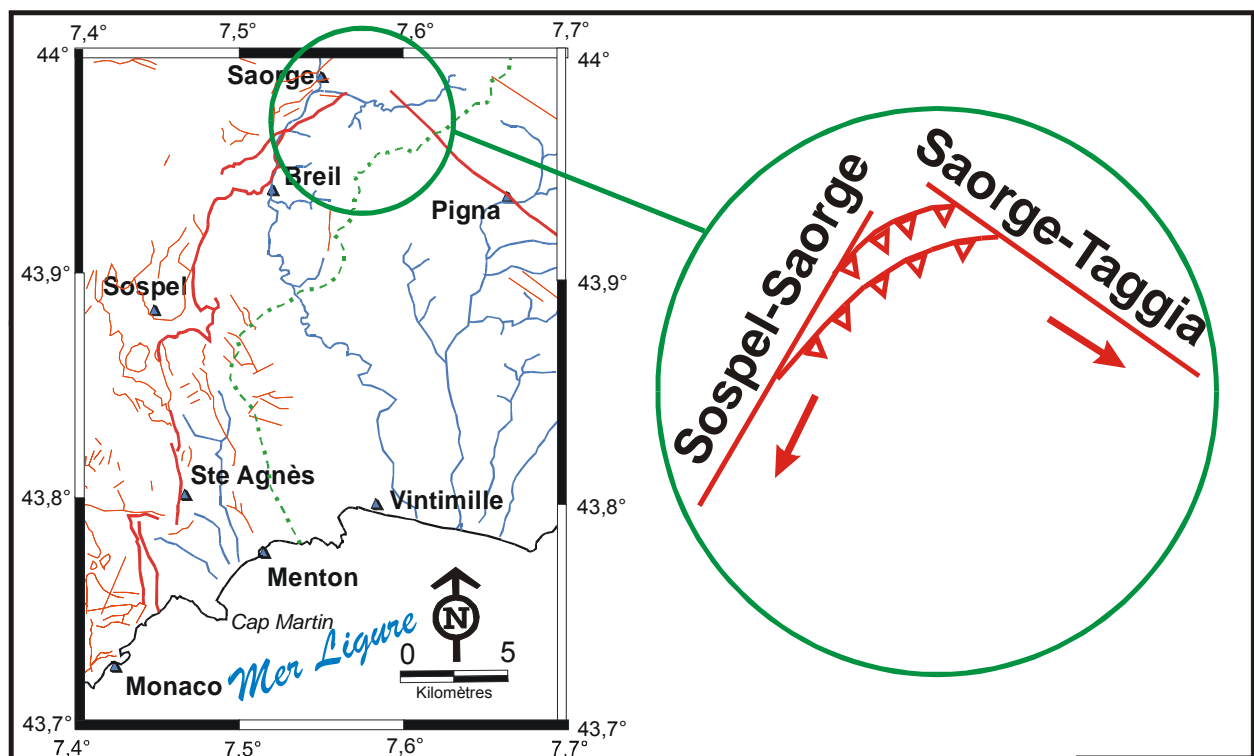


Figure 18 : Schéma structural simplifié du nœud tectonique de Saorge d'après Cosani (1996)

Chapitre 2 : Etat des connaissances

Ces failles de connections, identifiées sur le terrain lors de l'étude du nouveau tunnel du col de Tende (Com. orale Perez, 2004) seraient beaucoup plus anciennes puisqu'elles correspondraient à des paléofailles normales d'âge crétacé inférieur (Madeddu, 1997).

L'accident de Saorge-Taggia est le plus actif. Il a été notamment remobilisé pendant la crise sismique de fin 1983 dont le séisme le plus important a atteint le 4 décembre la magnitude de 3.5 et un séisme de magnitude 3 le 20 octobre 1986. L'accident Monaco – Sospel - Breil l'est aussi dans une moindre mesure sur la branche Sospel - Breil, la crise sismique de 1983 ayant débuté sur ce tronçon. Aucune sismicité n'a par contre été démontrée sur la branche sud de cet accident, à savoir le tronçon Sospel-Monaco.

Les mécanismes au foyer des séismes du 20 octobre 1986 et du 4 décembre 1983, l'étude composite de la crise sismique de décembre 1983 – janvier 1984 et celui du 02 juillet 1990 permettent d'attribuer un mouvement sénestre à l'accident de Breil - Monaco et un mouvement dextre le long des structures N120-130°E appartenant à la famille Saorge – Taggia (Bethoux, 1988) ce qui est en accord avec la déformation fragile finie (Gèze, 1968).

3.1.3.2.4. Activité sismique du bassin ligure.

La sismicité a un caractère diffus dans le bassin liguro-provençal. Les amas de séismes correspondent en général, pour un même site, à des crises sismiques dont le choc principal est de magnitude d'environ 4.5 (Bethoux *et al.*, 1992). Les crises sismiques ayant affecté le bassin ligure entre Nice et Gênes sont celles de juillet 1963 située à 75 km au sud-est de Monaco, de décembre 1989 et avril 1990 localisées à la limite du domaine ligure océanisé (Bethoux *et al.*, 1992). La crise sismique du 25 février 2001 (Courboulex *et al.*, 2002) localisée à une dizaine de kilomètres à l'ouest de l'épicentre de celui du 26 décembre 1989, c'est-à-dire à 30 km au sud de Monaco, fait partie de cette même linéation parallèle à l'axe N30-40°E du bassin.

Les séismes proviennent de failles liées au rifting Ligure et réactivées principalement en compression.

Les données disponibles (sismique, profil de sismique réflexion, et bathymétrie) ne sont pas assez denses pour cartographier les accidents du bassin.

3.2. Sismicité ressentie sur le territoire monégasque

Il n'y a pas réellement de sismicité sur le territoire monégasque, mais des séismes y sont régulièrement ressentis, dont certains localisés hors du cadre régional. Ces dernières années les principales secousses qui ont fait frémir la Principauté sont celles du :

- **26 décembre 1989** (Bethoux *et al.*, 1992) : ce séisme a été localisé à environ 30 km au sud de Monaco. De magnitude 4.5, il a été perçu jusqu'à Marseille. Cette secousse a eu pour conséquence des standards téléphoniques saturés et quelques mouvements de panique localisés.
- **15 avril 1990** (Bethoux *et al.* 1992) : séisme de magnitude 4.3. Comme l'année précédente, il a été ressenti sur toute la Côte d'Azur.
- **21 avril 1995** (Courboulex *et al.* 1998) : séisme de magnitude 4.7, localisé au nord de Vintimille. Ses vibrations ont été perçues sur tout le littoral de Savone à Marseille. A Monaco un début de panique fut observé. Plusieurs bâtiments furent évacués et les standards téléphoniques saturés pendant plusieurs heures. C'est la secousse la plus fortement ressentie à Monaco depuis le séisme de 1963.
- **26 juin 1997** séisme de magnitude 3.8 localisé près de Lantosque à environ 21 km de Monaco. Cette secousse ressentie par quelques personnes sur Monaco l'a été surtout à Lantosque, Clans, la Bollène-Vésubie, Roquebillière, Moulinet ainsi qu'à Sospel. Elle a provoqué dans ces villages quelques mouvements de panique mais aucun dégât.
- **1er novembre 1999** (Courboulex *et al.*, 2001) : séisme de magnitude 3.4. C'est le « petit séisme de Peille » très nettement ressenti sur Monaco.
- **19, 20 et 21 décembre 2000 et 17 janvier 2001** (Courboulex *et al.*, 2003) : crise sismique de Blausasc avec le choc principal qui a atteint la magnitude 3.4. Les 4 secousses plus importantes de cette crise ont été perçues sur Monaco. Pas de mouvement de panique.
- **25 février 2001** (Courboulex *et al.*, 2002) : séisme de magnitude 4.6, localisé à 25 km au sud de Monaco. Il a été ressenti par la grande majorité de la population côtière des Alpes-Maritimes. Les standards téléphoniques ont été saturés pendant une heure environ.

D'autres secousses moins importantes en terme d'intensité sur Monaco ont été perçues par quelques individus. Ce sont trois secousses de magnitude 4 localisées à l'Est de Monaco. Il s'agit des séismes du 6 février 2001, du 14 mars 2001 et du 18 juillet 2001.

Les séismes ressentis sur Monaco peuvent avoir leurs épicentres situés à plusieurs centaines de kilomètres de la Principauté. Ainsi ces dernières années deux zones « lointaines » ont présenté des amas de séismes dont certains ont été perçus par la population monégasque (Figure 19) :

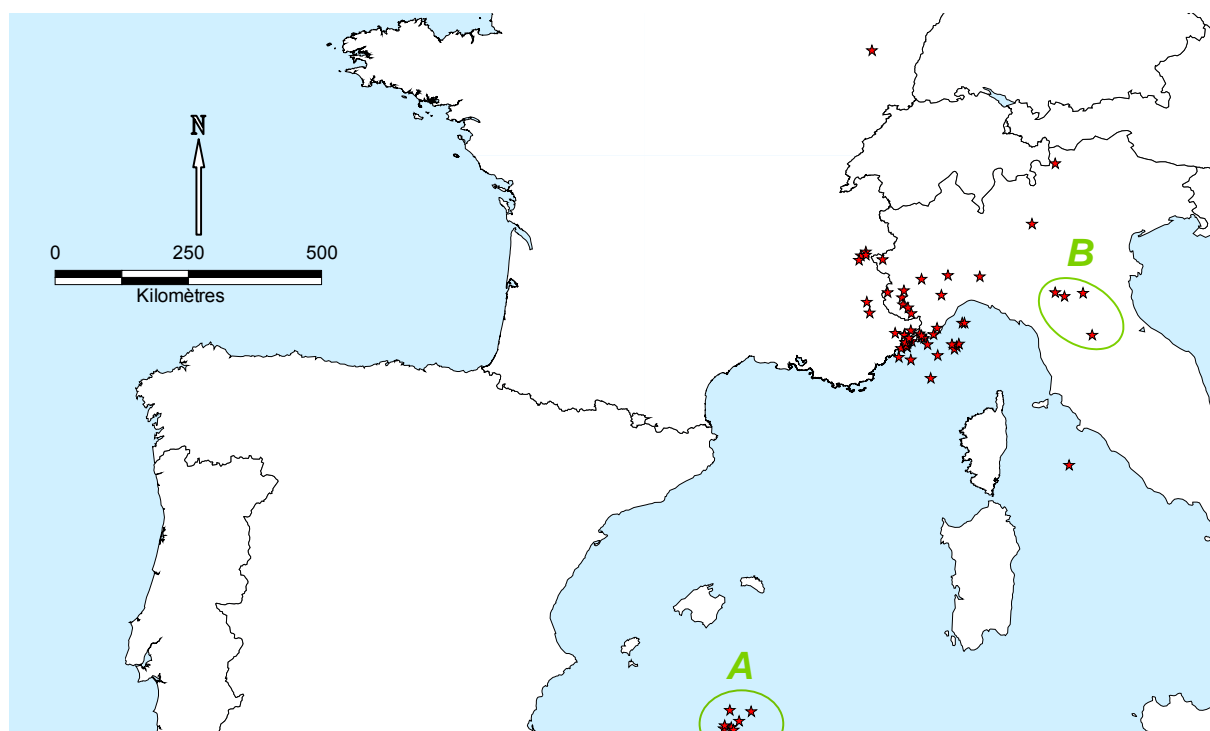


Figure 19 : Principaux séismes enregistrés sur la station de référence du Rocher de Monaco au cours de ces 7 dernières années pour une distance épicentrale inférieure à 800 km (données Renass). la zone A englobe la crise sismique d’Alger de mai 2003, la zone B le séisme du lac de Garde du 24 novembre 2004.

- la zone A, située à 800 km au sud de Monaco est celle du séisme de Boumerdès dont le choc principal a atteint la magnitude 6.8. Ce sont les ondes T de ces séismes (choc principal et les plus fortes répliques) qui ont nettement été perçues sur Monaco.
- la zone B, située à environ 400 km à l’Est de Monaco, avec notamment le séisme du lac de Garde du 24/11/04 qui a été ressenti par quelques personnes sur Monaco.

4. Conclusion sur la tectonique active

Les études tectoniques, géodésiques et sismologiques (Campredon *et al.*, 1977 ; Rebai, 1987 ; Guardia et Ivaldi, 1996 ; Schroetter, 1997 ; Calais *et al.*, 2000 ; Larroque *et al.*, 2001) indiquent que la structuration de l’arc de Nice s’est poursuivie durant le Plio-Quaternaire jusqu’à aujourd’hui, selon une compression globalement NNE-SSO à N-S. Ce raccourcissement s’est traduit par une surrection continue du massif de l’Argentera-Mercantour, par une remobilisation d’accidents préexistants, par une structuration centrifuge des arcs tectoniques de Nice et de Castellane en direction de leurs avant pays.

En résumé, c’est au cours des dernières 40 millions d’années, soit depuis le Lutétien supérieur – Bartonien jusqu’à l’époque actuelle, que la région a subi les effets du rapprochement des plaques européenne et africaine. Ces effets se sont traduits par une sédimentation et une tectogenèse en convergence marquées par des périodes paroxysmiques diverses au cours de l’Oligocène, du Miocène et du Pliocène (Ivaldi, 1989).

Larroque *et al.* (2001) se posent un certain nombre de questions pour tenter d'estimer la magnitude maximale possible pour la région :

- les failles actives mises en évidence sont-elles divisées en divers segments de différentes taille et activité ?
- quelles sont les relations entre les structures en mer et celles à terre ?
- le séisme le plus important enregistré au cours des dernières décennies est celui de juillet 1963 qui a atteint la magnitude 6.0 et qui est localisé en mer à 80 km de la côte. Y aurait-il des failles dans le domaine terrestre capables de produire des séismes de cet ordre de magnitude ?

A ces diverses questions nous rajouterons les suivantes :

- 1- Quel est le lien entre les failles cartographiées qui décalent les structures géologiques quelquefois de plusieurs kilomètres et la sismicité actuelle ?
- 2 – Seul un réseau dense de stations sismologiques permet de localiser précisément un séisme. C'est le cas du réseau mis en place lors de la campagne SALAM qui a permis d'enregistrer la crise sismique de Blausasc. La plupart des autres séismes ne sont pas aussi bien contraints et présentent donc une localisation moins précise. Etant donné la complexité de la fracturation de notre région quelle valeur peut-on accorder à la localisation de la majorité des séismes qui n'ont jamais été relocalisés ou qui ne pourront jamais l'être ?
- 3- Avec une sismicité peu importante et relativement diffuse et une pénurie d'indices morphologiques d'activités actuelles, quelles sont les solutions et les moyens pour essayer d'expliquer les séismes majeurs destructeurs rapportés par les archives ?
- 4- Dans notre zone de sismicité moyenne, étant donné le faible recul dans le temps de la sismicité historique (500 ans) et l'importante imprécision sur les localisations de la majorité des épicentres (50 ans), quel crédit peut-on accorder à ces données qui ne sont qu'un instantané, sans doute peu représentatif, de la sismicité actuelle de notre région ?
- 5- Dernière question essentielle pour les dirigeants qui sont en charge des biens et des personnes d'un Etat comme celui de Monaco : quelle valeur en l'état actuel des connaissances sur l'aléa sismique de Monaco, peuvent-ils accorder à la définition d'un séisme de référence duquel découlera toute la politique parasismique de la Principauté ?

CHAPITRE 3 : ANALYSE GEOMATIQUE DE LA DEFORMATION FRAGILE REGIONALE

L'exploitation des Modèles Numériques de Terrains (M.N.T.) et des images satellitaires pour l'identification de nouveaux accidents n'est pas nouvelle. Cependant les traitements s'améliorent et les appareillages embarqués à bord des satellites sont toujours plus perfectionnés. L'utilisateur bénéficie de technologies permettant de mettre en évidence des objets invisibles pouvant être des indices d'accidents néo-tectoniques.

Le principe de la télédétection est basé sur l'enregistrement de la réflectance et/ou de la luminance des matériaux. Ce sont les images des satellites Européen Spot et Américain Landsat 5 qui sont utilisées dans cette étude. L'intérêt du satellite SPOT réside dans sa précision et celui de Landsat dans ses sept capteurs multispectraux couvrant autant de bandes spectrales qui offrent la possibilité d'effectuer de nombreux traitements d'images. De plus certains domaines spectraux non visibles par l'homme tel que l'infrarouge apportent une information complémentaire utile (Chorowicz et Deroin, 2003). L'analyse de ces différents traitements qui font ressortir par des contrastes colorés les différentes nuances du terrain permettra de démontrer que cette technologie est adaptée à la problématique de ce type d'étude.

Le principe de l'exploitation des données du M. N. T. est basé sur une représentation 3D des mesures topographiques de terrains classiques et des mesures bathymétriques au travers d'images traitées. L'intérêt de cette méthode complémentaire de la précédente est qu'elle permet de s'affranchir des perturbations liées aux ombres, à la végétation et aux constructions. De plus, avec les données bathymétriques, une représentation du relief sous-marin est possible. Des traitements faisant ressortir le réseau hydrographique ou les ruptures de pente facilitent la détermination des accidents topographiques.

L'observation brute, c'est-à-dire sans se référer à la connaissance actuelle du découpage crustal de la région, permet dans un premier temps de mettre en évidence l'ensemble des accidents qui marquent la morphologie et dans un second d'identifier ceux qui n'avaient jamais été reconnus par les techniques classiques.

L'un des plus importants séismes européens de magnitude estimée à 7.8 a eu lieu en 1904 dans la région des Balkans près de Kuprnik dans la vallée de la Struma. Aucune surface de rupture, ni de failles à la source des événements de 1904 n'avaient encore été identifiées. Meyer *et al.* (2001) en utilisant l'imagerie satellite recoupée par des observations de terrains ont cartographié des failles actives tout près et dans la zone épicertrale.

Dans la région, dès les années 1980, l'interprétation des images satellitaires ERT1 révèle un important accident rectiligne de Saorge à Taggia interprété en décrochement dextre post pliocène (Dadou *et al.* 1984, Hoang-Trong *et al.*, 1987), accident déjà bien connu par ailleurs (Julian, 1976) qui offre pourtant peu d'indices morphologiques (absence de marqueurs) sur le terrain.

Les accidents actifs déjà répertoriés (Larroque *et al.*, 2001) pourraient à nouveau être mis en évidence au même titre que les « nouveaux accidents » jusqu'à présent invisibles par les méthodes classiques mais dont l'influence sur la morphologie ressortirait par des traitements d'images.

L'objet de ce travail est de définir une méthodologie qui puisse apporter des éléments novateurs à la compréhension du découpage crustal régional et local, en identifiant l'ensemble des accidents, indépendamment du décalage des structures géologiques qu'ils peuvent engendrer mais uniquement par leur influence sur la morphologie.

1. La déformation fragile finie et ses échelles d'observation

1.1. Intérêt de l'analyse géomatique dans la région

La mise en œuvre privilégiée de la télédétection spatiale en géomorphologie et géologie par rapport aux vues aériennes, est justifiée par deux caractéristiques complémentaires :

- la qualité des capteurs multispectraux embarqués dans les satellites,
- la vue synoptique qu'offre les images satellitaires. La surface étant observée de loin, les détails ne sont pas visibles mais les grandes structures apparaissent (Chorowicz et Deroin, 2003).

Dans notre région il est difficile d'identifier des fractures ou des failles sur le terrain mais aussi sur les photographies aériennes pour plusieurs raisons. En dehors des agglomérations, les zones sont boisées ou cultivées (dans l'arrière pays niçois, la plupart des zones agricoles abandonnées sont remplies de restanques). C'est pour cette raison que les images satellitaires sont souvent utilisées pour ces reconnaissances car à cette échelle le « bruit », causé par le très grand détail offert par les photos aériennes, a disparu (Arlegui et Soriano, 1998).

Le taux d'érosion pour le climat méditerranéen est de 0,1 à 1 mm par an (Saunders *et al.*, 1983, Bigot-Cormier, 2000). L'érosion d'une trace de tectonique active même importante serait donc effacée en moins de 10000 ans. De plus, les précipitations rares mais intenses caractéristiques du climat Méditerranéen favorisent dans les reliefs abrupts de notre région l'érosion gravitaire (éboulement) des terrains les plus friables tels que les marno-calcaires du Crétacé. La continuité d'un alignement ou des traces d'activité actuelle peuvent être rapidement gommées dans le paysage. De plus, les zones de failles sont souvent des zones de faiblesses lithologiques où l'érosion se concentre. Une succession d'indices morphologiques permettrait de mettre en évidence une faille qui ne décale pas les structures géologiques et qui ne présente en surface aucune trace d'activité actuelle. Cette succession d'indices morphologiques n'est observable qu'à partir d'une certaine altitude qui permet de lisser les perturbations liées à l'érosion.

1.2. Définition des termes appliqués à l'observation de la déformation fragile finie

1.2.1. Les indices de déformation

Le terme « indice » utilisé dans la base NEOPAL (Néotectonique et Paléosismicité) du BRGM (rapport BRGM, 1996) et dans la suite de cette étude, est synonyme de l'observation locale d'une déformation dont l'origine tectonique est une des hypothèses qui peut ne pas être établie avec certitude.

Les indices de déformation récente s'expriment entre autres par (Grellet *et al.*, 1993) :

- des ruptures sur des failles généralement préexistantes affectant des formations géologiques superficielles ;
- des plis, bombements ou flexures qui témoignent de mouvements dans la couverture ou dans le socle ainsi que la présence de failles cachées ;
- des reliefs ou des bassins indiquant des mouvements verticaux.

Et plus indirectement par :

- des anomalies morphologiques des formes du relief ou du réseau hydrographique (anomalies morpho-structurales),
- des sources hydrothermales et minérales qui traduisent des remontées d'eaux profondes le long de fractures.

Le terme « jeu ou rejeu récent » comprend les accidents qui s'exprimeraient par une sismicité importante ou par une influence marquée sur la morphologie.

1.2.2. Comportement rhéologique des roches

Le comportement rhéologique des roches peut se ramener à une combinaison de trois types simples :

- le comportement élastique qui concerne les déformations dites actuelles telle que la propagation des ondes sismiques,
- le comportement ductile où les roches se déforment de manière continue sans se rompre,
- le comportement fragile, où il y a rupture des roches et déformation discontinue et qui est à la base de la formation des accidents géologiques.

1.2.3. Définition des différentes échelles d'alignements d'objets sur les images satellitales.

- Un alignement peut être défini comme une ligne droite ou légèrement courbe, alignant des éléments topographiques, morphologiques et géologiques, de différentes échelles. Il est généralement considéré comme exprimant une structure crustale (Hobbs, 1905 ; Dennis, 1967).
- Un linéament est un alignement d'échelle régionale. Nous distinguerons donc les linéaments de longueur supérieure à quelques dizaines de kilomètres et ceux de plus faible longueur (Chorowitz, 1980).
- Un linéament tectonique désigne des familles de failles qui s'agencent en couloir de largeur hectométrique à plurihéctométrique sur des distances plurikilométriques,
- Une faille est un alignement isolé que nous supposons tectonique de par son influence visible sur la géométrie des structures géologiques.
- Le terme de diaclase sera réservé à des alignements tectoniques qui ne provoquent aucun décalage visible dans les structures géologiques.

2. Méthodologie.

Le but de cette phase de travail est de rechercher tous les alignements susceptibles d'avoir une signification en terme de *déformations fragiles* : linéaments, failles, champs de diaclase. L'ensemble de ces alignements compose ce que l'on appellera la fracturation de la zone d'étude. Certains indices de déformations récentes et notamment les anomalies morpho-structurales vont être mis en évidence avec une recherche de linéaments et failles sur des traitements d'images satellitaires et de Modèles Numériques de Terrains.

2.1. Choix d'un partenariat avec une entreprise spécialisée

Dans un souci d'efficacité nous avons fait le choix de bénéficier de l'expérience d'une entreprise spécialisée dans le traitement des images satellitaires en mettant au point un protocole d'étude avec un travail itératif entre nous et cette société.

Dans le cadre de la convention signée en 1998, c'est la société Eosys, spécialisée dans le traitement d'images et des M.N.T appliqués à la géologie, qui a été retenue. Cette entreprise a acquis une solide expérience dans la région avec plusieurs applications, notamment l'étude sur le tunnel du Mercantour et celle sur le tunnel descendant de la Moyenne corniche-Monaco.

Plusieurs traitements d'images nous ont été proposés dans un premier temps. En fonction de ces résultats (meilleure combinaison, traitement particulier d'un M.N.T), de nouveaux traitements plus performants ont été réalisés dans certains secteurs.

2.2. Description de la méthodologie appliquée dans cette étude

Le but de cette méthode est donc d'avoir d'une part, une vue synthétique des grandes directions structurales marquant la morphologie autour de la zone de Monaco et d'autre part, d'identifier des alignements qui pourraient être des accidents tectoniques à jeu ou rejeu récents.

Des alignements visibles sur plusieurs types de données ont plus de chance de correspondre à une réalité que ceux visibles sur un seul type d'image (Hintigton et Raiche, 1978 ; Carrère, 1990). Dans notre étude l'existence des alignements majeurs sera validée par leur présence sur plusieurs types d'images satellitaires (Landsat Hiver, Landsat Été, Spot et MNT).

Des calculs statistiques permettront d'apprécier les directions de fracturation privilégiées de la région. Deux classements seront réalisés dans cette étude :

- le classement des alignements en fonction de leur direction,
- le classement de ces alignements en fonction de leur longueur, qu'ils soient déjà répertoriés dans la littérature scientifique ou non.

Les alignements les plus visibles seront vérifiés sur le terrain pour s'assurer de leur nature tectonique. Si les indices sont suffisamment nombreux et cohérents ils pourront être interprétés comme des accidents à jeu ou rejeu récents. Les accidents les plus importants en terme de longueur, une fois contrôlés et expliqués, seront comparés avec les données géologiques cartographiques actuelles (feuille Menton – Nice 1/50.000^e, Gèze, 1968) et les données sismotectoniques connues (Larroque *et al.*, 2001). Cette comparaison permettra d'apprécier les nouveaux accidents mis en évidence tout en confirmant l'applicabilité de cette méthode à notre problématique.

Rappelons enfin que l'importance de la magnitude d'un séisme est proportionnelle à la longueur de la faille. Les observations réalisées dans cette étude concernent uniquement la partie visible des failles. A défaut de définir une magnitude précise, ces parties visibles pourront donner des renseignements qualitatifs sur le potentiel de l'accident. L'identification des linéaments est une des principales applications de la télédétection en géologie.

2.3. Les particularités des images de Landsat 5

Ce sont les images du satellite Landsat 5 qui sont utilisées dans cette étude. Ce satellite répète le cycle héliosynchrone tous les 16 jours à l'altitude moyenne de 705 km. L'orbite polaire héliosynchrone permet au satellite de passer toujours à la même heure solaire locale sur un même point de la Terre. Landsat 5 contient les systèmes MSS et TM (Thematic Mapper) ; Le système Landsat 5 enregistre les données en sept bandes spectrales (Tableau 4), six bandes réfléchies et une bande thermique (bande 6). Les six bandes réfléchies couvrent respectivement :

- la partie visible (bandes 1,2 et 3),
- l'infrarouge proche (bande 4),
- l'infrarouge moyen (bandes 5 et 7).

Bandes	Longueur d'onde (µm)	Caractéristiques
BANDE 1	0.45 - 0.52	Bleu-vert. Maximum de pénétration dans l'eau, très utile en cartographie bathymétrique dans l'eau peu profonde et aussi pour distinguer le sol de la végétation.
BANDE 2	0.52 - 0.60	Vert. Coïncide avec le maximum de réflexion de la végétation dans le domaine visible
BANDE 3	0.63 - 0.69	Rouge. Coïncide avec la bande d'absorption de la végétation, importante dans la discrimination des types de végétations.
BANDE 4	0.76 - 0.90	IR. Contient l'information due à la présence du fer et maximum de réflexion de la végétation
BANDE 5	1.55 - 1.75	MIR. Forte sensibilité aux radicaux OH ⁻ et intéressante pour les interprétations structurales
BANDE 6	10.4 - 12.50	IR thermique. Les images prises durant la nuit sont utiles en cartographie thermique et pour l'estimation de l'humidité du sol
BANDE 7	2.08 - 2.35	IR. Coïncide avec une bande d'absorption liée à la présence d'ions hydroxyles dans les minéraux.

Tableau 4 : Les bandes du satellite américain Landsat 5 avec leurs longueurs d'ondes et leurs caractéristiques.

La bande 6 couvre la partie infrarouge thermique du spectre dans l'intervalle 10,4-12,5µm. Les images Landsat couvrent une surface de 170 x 185 km, avec une résolution de 30 m pour les bandes réfléchies, et de 120 m pour la bande émise (thermale). Les avantages des scènes Landsat est qu'elles incluent la combinaison de la grande résolution avec la grande surface de

la couverture. De plus les sept bandes permettent une meilleure discrimination des matériaux de surface. Les combinaisons multibandes les plus utilisées et leurs particularités sont présentées au tableau suivant.

Composition colorée	Les caractéristiques
3-2-1	Couleurs réelles de l'image
1-3-5	Très intéressant pour discerner les limites lithologiques entre les roches
7-5-4	Le meilleur résultat à utiliser pour l'analyse géologique ; la bande 4 est concernée à la présence du fer, la bande 5 caractérise l'albédo général des matériaux, et la bande 7 celle des minéraux hydroxyles
7-4-1	Fournit le minimum de redondance des données, le meilleur résultat pour différencier les différentes unités des roches
2-5-4	Permet une bonne perception des structures géologiques
7-4-3	Bonne séparation entre les végétaux et sols nus, et aussi entre les différents niveaux d'activités de la végétation

Tableau 5 : Différentes compositions de 3 bandes du satellite Landsat 5 avec leurs caractéristiques. Les bandes sont présentées dans l'ordre rouge – vert - bleu [Lillesand et Kieffer, 1987]

Par exemple dans le bassin de l'Ebro (nord-est de l'Espagne) Arlegui et Soriano (1998) ont examiné différentes combinaisons des trois bandes de Landsat 5, les images présentant les meilleures qualités visuelles ont été obtenues avec une image en fausse couleur utilisant les bandes 2, 4 et 7. Cette combinaison avait déjà été utilisée avec succès dans des régions arides (White, 1993).

Toutes les autres combinaisons que celles présentées dans le Tableau 5 -notamment celles qui utilisent la bande 6 de l'infrarouge thermique- ont des caractéristiques non établies qui dépendent de plusieurs facteurs : état de la végétation, époque de la prise de vue, type de terrains etc. Les traitements sélectionnés dans cette étude sont ceux qui, sur une prise de vue particulière, font ressortir des détails de la morphologie plus nettement que sur d'autres traitements.

Les systèmes de télédétection s'intéressent aux deux catégories du rayonnement, celui absorbé ou réfléchi par la surface de la Terre et le rayonnement émis par la surface elle même. Ces rayonnements sont décrits en **annexe 2**.

2.4. Les Modèles Numériques de Terrains (M.N.T.) et les variables morphométriques

Les valeurs de l'altitude topographique exprimées sous forme digitale sont connues sous le nom de modèle numérique de terrain (MNT). Le MNT est la représentation numérique du relief, interpolée à partir d'un échantillonnage de la surface. Il consiste en un maillage en deux dimensions qui contient les valeurs d'altitude (z) où $z=f(x,y)$. Il détermine une surface en trois dimensions où les nœuds de maillage s'alignent en lignes et colonnes selon les axes x et y .

Les MNT peuvent être obtenus à partir de données différentes : dans cette étude certains sont obtenus par photos aériennes et d'autres par les données cartographiques de l'IGN (BDTopo).

La qualité d'un MNT dépend essentiellement de sa précision et sa résolution : la précision indique l'écart qui existe entre les altitudes du MNT et les altitudes réelles. La résolution, par contre, indique la dimension des plus petits objets séparables et dépend de la densité des points du MNT par unité de surface (taille au sol des mailles formées par les points du MNT). On parle de "pas du MNT" quand on définit la taille de ces mailles, donc la distance entre les

points du MNT dans le sens horizontal. Il est évident que le choix d'un pas dépend de la densité des données échantillonnées au départ.

Des traitements morphologiques sont réalisés sur le M.N.T pour son exploitation. Les traitements de base mettent en exergue les différentes pentes et le taux de changement des pentes d'une surface topologique de terrain. De même l'application d'un ombrage au relief offre de la profondeur aux images topographiques. Ce sont donc essentiellement ces variables morphométriques qui sont modifiées dans les différents traitements et qui sont explicitées en annexe 3.

3. Les traitements

Pour la reconnaissance des alignements, trois documents de base ont été exploités lors de cette première phase de travail : deux images du satellite Landsat et un M.N.T. composite terre-mer

3.1. Images satellitaires

Un cliché Landsat réalisé le 23 juillet 1984 avec comme limites géographiques (Figure 20) :

- au sud, la plage d'Eze sur mer,
- à l'ouest, Saint-Laurent-du-Var,
- à l'est, Bordhigera,
- au nord, le Brec d'Utelle .



Figure 20 : Cliché Landsat 5 du 23 juillet 1984, traitements en fausses couleurs à partir des images des canaux 4,5 et 6. © Eosys – DEUC.

Un cliché Landsat réalisé le 6 février 1987 avec comme limites géographiques (Figure 21) :

- au sud, la côte,
- à l'ouest, Saint-Laurent-du-Var,
- à l'est, Ventimiglia,
- au nord, l'extrémité sud de Sospel.



Figure 21 : Cliché Landsat du 6 février 1987, traitement en fausses couleurs à partir des images des canaux 5, 3 et 1. © Eosys –DEUC.

Ces deux documents de base sont traités afin de faire ressortir au mieux les accidents morphologiques. Une vingtaine de traitements ont été réalisés sur chacun des clichés.

Les traitements retenus ont été les suivants :

- fausses couleurs à partir des images des différents canaux (canaux 1, 2 et 3 ; canaux 4, 5, et 6, canaux 1, 3 et 5, canaux 1, 2, 3 et 5) ;
- combinaison des canaux 4, 5 et 7 et leurs gradients en X ;
- combinaisons de ratios : canal 7/canal 5, canal 5/canal 4, et canal 3/canal 2, canal 4/canal 3, et canal 3/1.

3.2. M.N.T.

Pour étudier la région deux MNT composites à différentes échelles (régionale et locale) ont été réalisés.

3.2.1. MNT composite terre-mer à pas de 50 m

Il a été réalisé par l'assemblage de deux MNT (Figure 22) :

- un MNT terrestre au 1/25.000^e à partir des données altimétriques de l'Institut Géographique National (I.G.N) issues de photogrammétrie au 1/60.000^e. Ce MNT correspond à une zone de 200 km² restituée sous forme de grille à pas de 50 m ;
- un MNT marin à partir des données bathymétriques de l'IFREMER, SHOM et LHF qui, après traitement, ont été échantillonnées au pas de 50m.

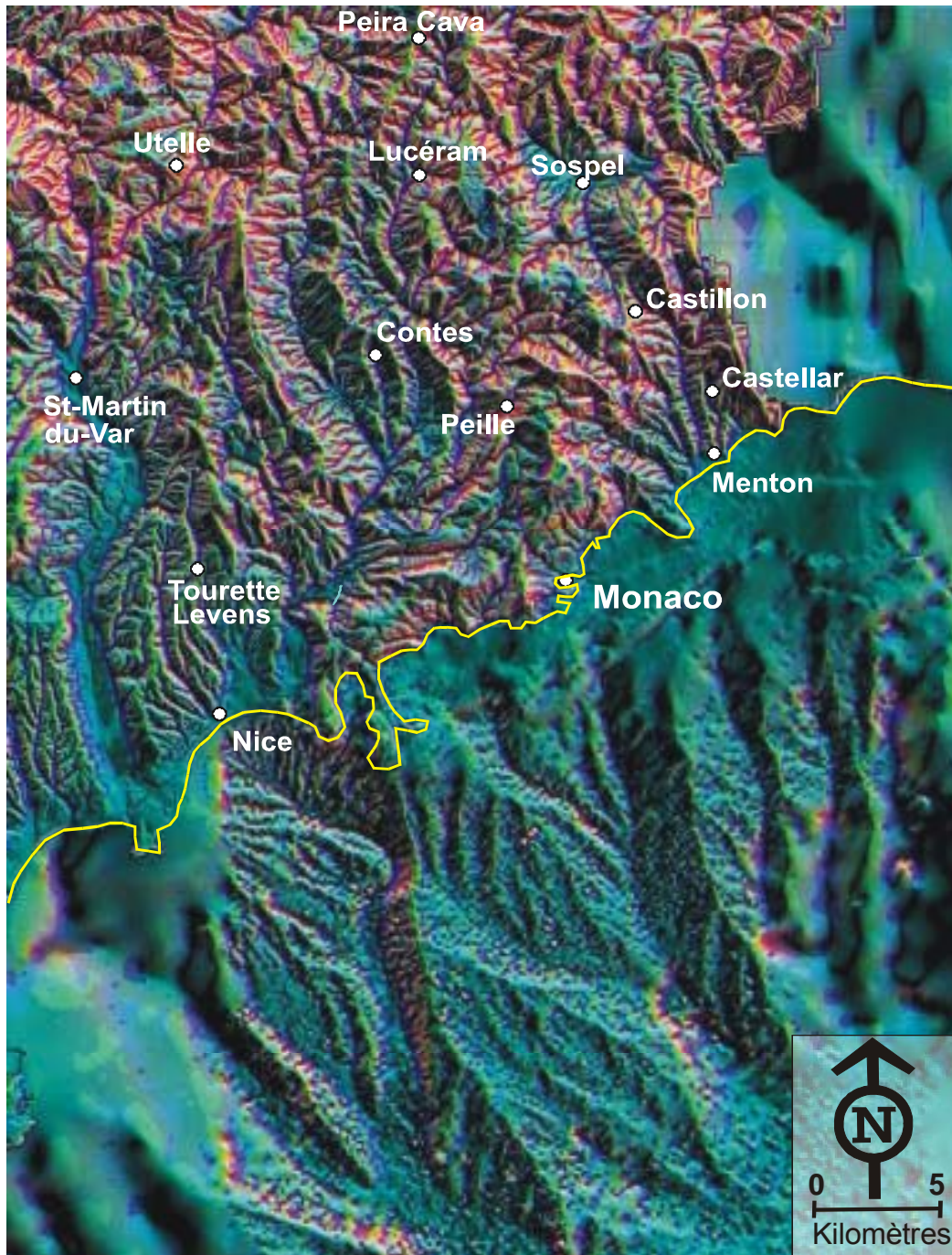


Figure 22 : MNT au 1/25.000^e terre et mer calculé respectivement à partir des données altimétriques de l'Institut Géographique National (IGN) issues de photogrammétrie au 1/60.000^e et d'une compilation des données bathymétriques de l'IFREMER, SHOM et LHF © Eosys – DEUC.

Les limites géographiques du MNT composite au 1/25.000^e à pas de 50 mètres sont :

- au sud, à 15 km au large de la côte,
- à l'ouest, Saint-Laurent-du-Var,
- à l'est, la frontière italienne,
- au nord, le Brec d'Utelle.

3.2.2. MNT composite à pas de 10 mètres autour de Monaco

Ce MNT composite comprend trois MNT au 1/5.000^e.

Un MNT au 1/5.000^e de Monaco dérivé des données topographiques au 1/5.000^e.

Les limites géographiques du MNT au 1/5.000^e de Monaco à pas de 10 mètres sont :

- au sud à 10 km au large de la côte,
- à l'ouest, le Cap Mala,
- à l'est, la baie de Roquebrune,
- au nord, le Pas des Cabanelles.

Deux MNT au 1/5.000^e, réalisés à partir de deux triplets de photos aériennes de la mission IGN FD-06/250 de juin 1999, ont complété le premier traitement :

- Secteur 1 (nord) : photos 605, 606, 607 couvrant les villages de Peille, Gaudisart, les Camps, le Rivet, Segra, jusqu'aux environs de Ste Agnès.
- Secteur 2 (ouest) : photos 628, 629, 630 couvrant les villages de Drap, Sainte Thècle, Peillon, La Grave-de-Peille, Blausasc, La Vernéa jusqu'aux environs de Contes.

La jonction de ces deux secteurs se situe à l'ouest de Peille. Deux MNT au pas de 10 mètres ont été calculés pour ces deux secteurs. Le MNT du secteur nord couvre une superficie de 5,4 x 6 km. et celui du secteur ouest une superficie de 5,8 x 6,2 km.

Ces trois MNT ont été fusionnés avec le MNT au pas de 50 mètres extrait de la BDTopo d'IGN échantillonnée avec un pas de 10 mètres. Le MNT composite couvre ainsi une superficie de 11,5 x 15,8 km (Figure 23).

Avec le même objectif que pour le traitement des images satellitales, les traitements des M.N.T choisis sont ceux qui font ressortir au mieux la fracturation. L'ensemble de ces traitements résulte d'une combinaison de la pente, de la courbure de l'altitude et de l'ombrage du relief. Sur certains un calcul spécifique a été réalisé pour faire ressortir les crêtes et les réseaux de drainages.

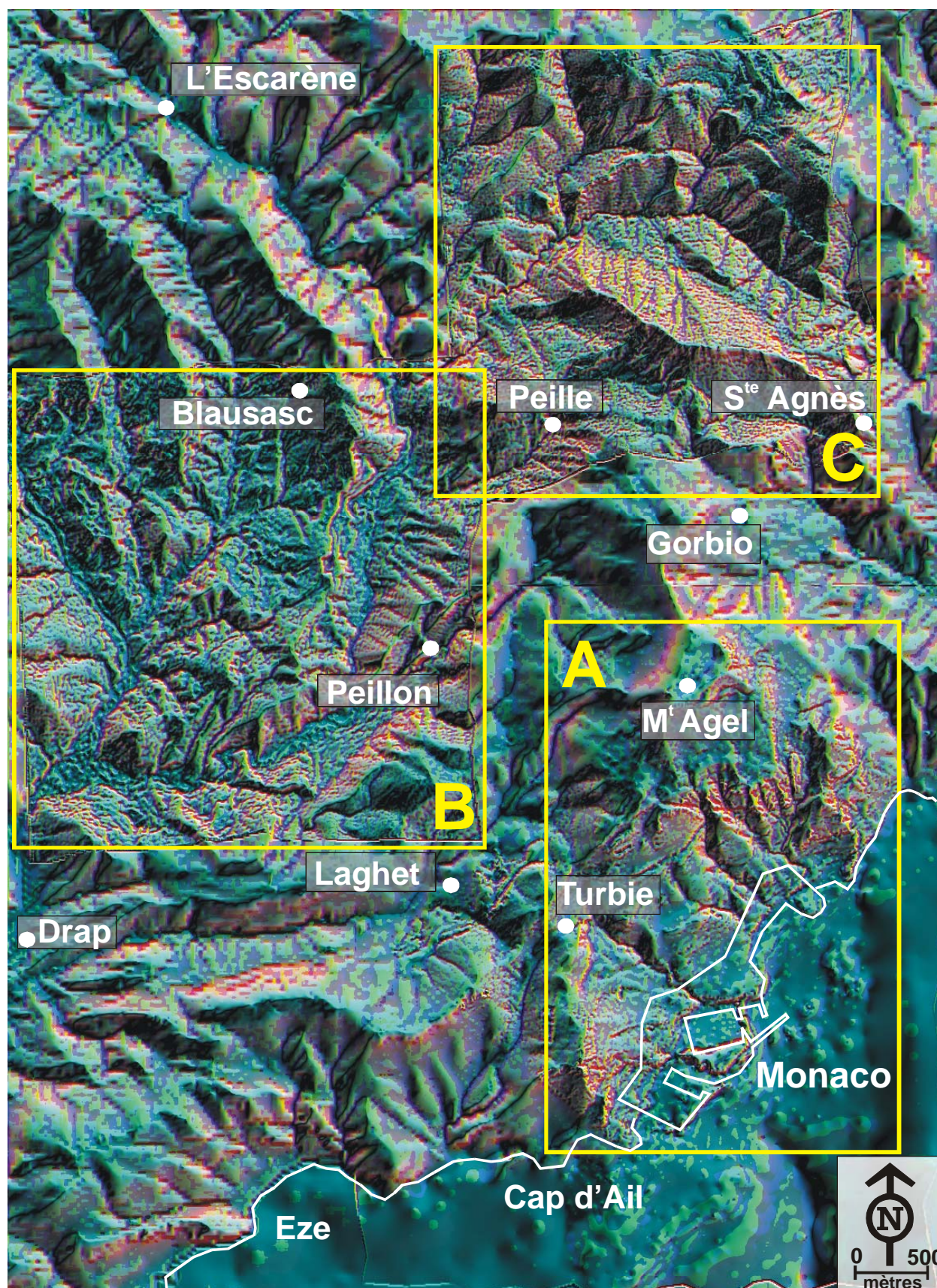


Figure 23 : MNT composite au 1/5.000^e réalisé à partir du MNT de Monaco dérivé des données topographiques à 1/5.000^e (A) et des MNT issus de deux triplets de photos aériennes de l'IGN, secteur nord (C) et secteur ouest (B); Ces trois MNT sont fusionnés sur le fond MNT au pas de 50m extrait de la BD-Topo d'IGN © Eosys – DEUC.

3.3. Remarques sur la qualité des documents bruts

La scène d'été est fortement affectée par la végétation et par la proximité de la mer qui crée des conditions de brume atmosphérique variables.

La scène d'hiver, plus riche en renseignements lithostratigraphiques et pétrographiques, est affectée à la fois par l'éclairage rasant du soleil qui crée des ombrages et par une couverture neigeuse sur les hautes montagnes.

Parmi ces traitements les combinaisons fausses couleurs se sont avérées les plus riches en informations pour ce qui concerne les accidents morphologiques.

Pour la bathymétrie, les traitements des données IFREMER présentent un bruitage qui masque des détails pouvant affecter la détermination de certains alignements mineurs. Cependant la morphologie du relief marin permet de tirer quelques enseignements utiles notamment dans la continuité des accidents terrestres en mer.

3.4. Procédure d'analyse des documents

L'objectif est de faire ressortir les principales directions structurales et de déterminer les alignements principaux.

Tous les alignements morphologiques sont tracés (Figure 24), sous Système d'Information Géographique, sur l'ensemble des images traitées (images satellitaires ou M.N.T.). Seuls les alignements qui se retrouvent sur une majorité de traitements sont retenus (Hintington et Raiche, 1978 ; Carrère, 1990). Cela permet de s'affranchir d'artefacts qui découleraient de traitements particuliers.

Le traitement statistique de ces alignements permet de les hiérarchiser suivant leur direction et leur longueur. Ce traitement se fera aux échelles régionale au 1/25.000^e et locale au 1/5.000^e.

Dans un premier temps la hiérarchisation des directions de ces alignements est présentée sous forme de rosaces bidirectionnelles par pas de 10°. Nous déterminerons trois groupes principaux avec par ordre décroissant d'importance : les directions majeures, secondaires et mineures. Deux classements de ces directions sont réalisés :

- pour l'ensemble de ces alignements (sans considération de leur longueur),
- par séries de longueurs supérieures à 2500 m, comprises entre 2500 et 1500 m et inférieures à 1500 m.

Ces grandes directions seront comparées avec celles de la déformation fragile finie (Gèze, 1968 ; Guardia et Ivaldi, 1996) et pourront ainsi valider la méthode.

Dans un second temps la hiérarchisation de ces alignements se fera suivant leur taille. Les alignements majeurs seront comparés aux accidents connus (Gèze, 1968) ou supposés actifs (Larroque *et al.*, 2001).

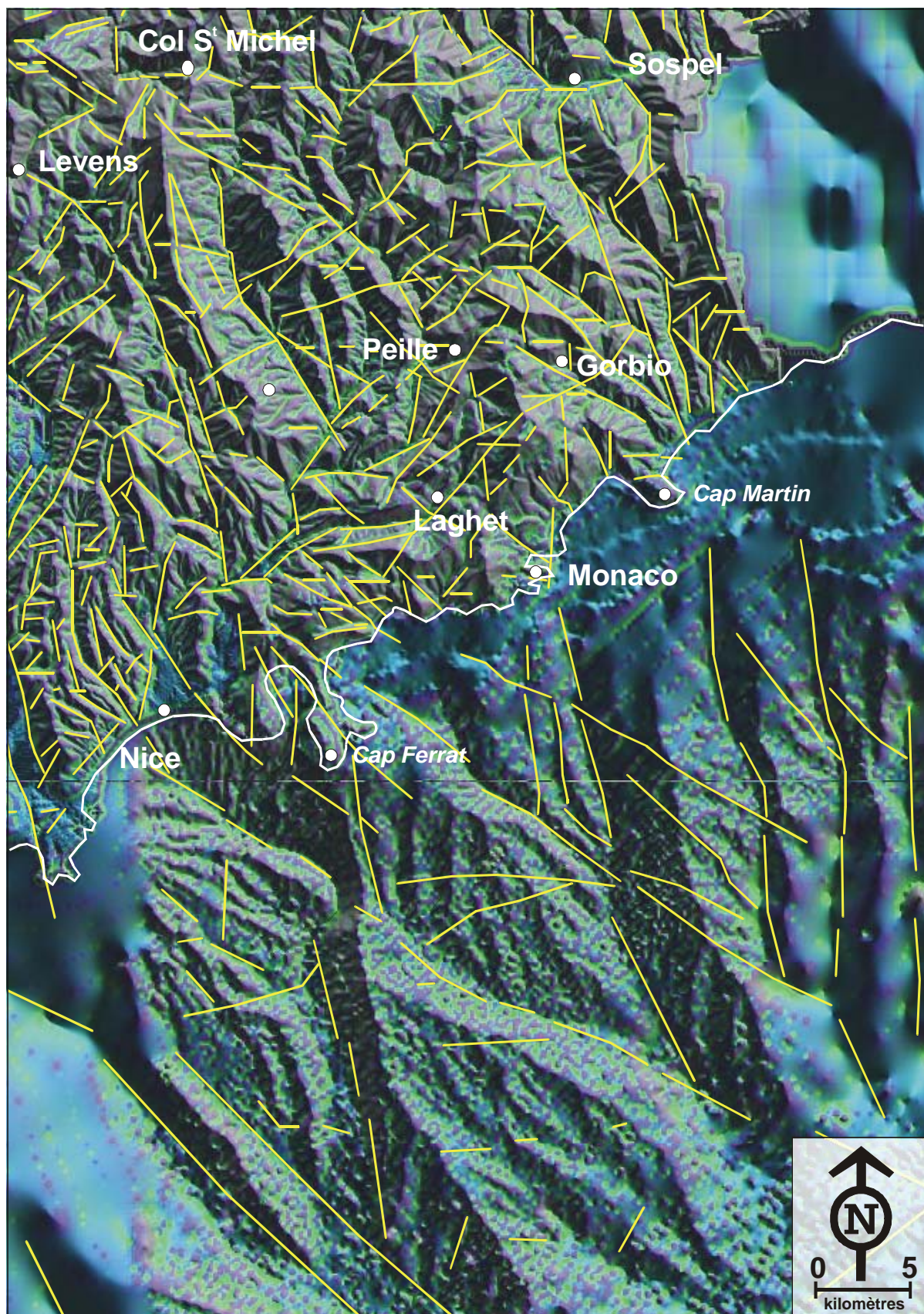


Figure 24 : Totalité des alignements observés sur le MNT composite terre-mer au 1/25.000^e sans aucune distinction de fraîcheur, de taille ni de signification tectonique © Eosys – DEUC.

4. Résultats

4.1. Les familles d'alignement d'extension régionale

4.1.1. Domaine terrestre

4.1.1.1. Hiérarchisation des familles de directions de ces alignements

a) hiérarchisation de la totalité des structures linéaires sans considération de leur longueur

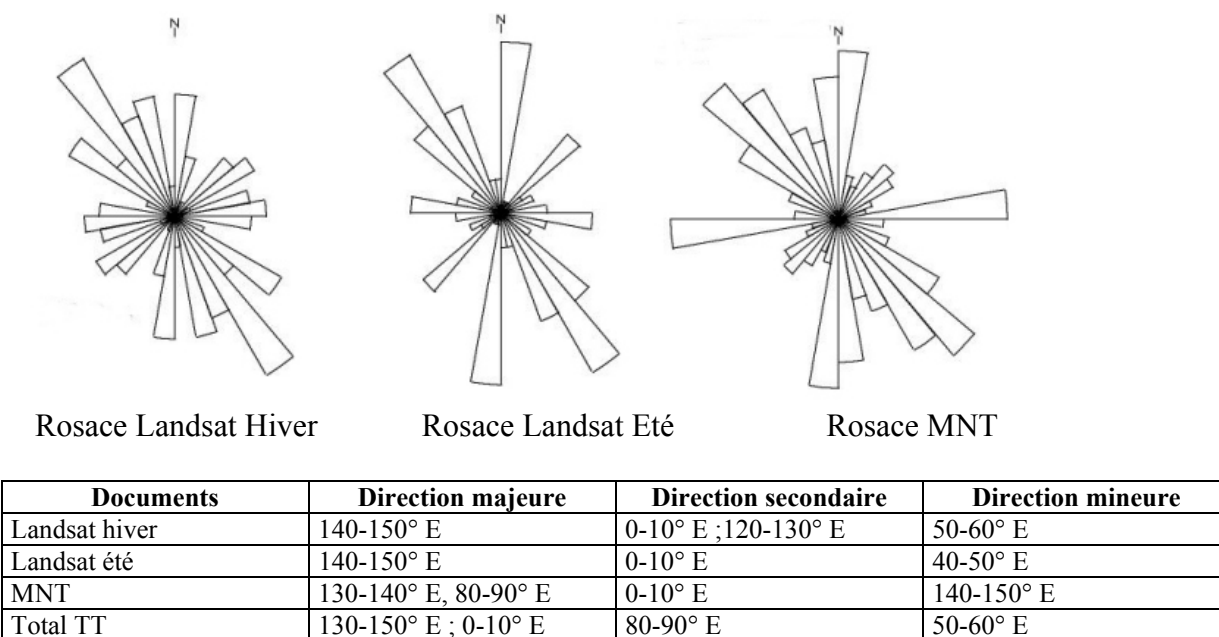


Figure 25: Directions principales observées sur chacun des documents (images satellitales et M.N.T.).

b) Hiérarchisation des directions des structures linéaires par séries de longueur

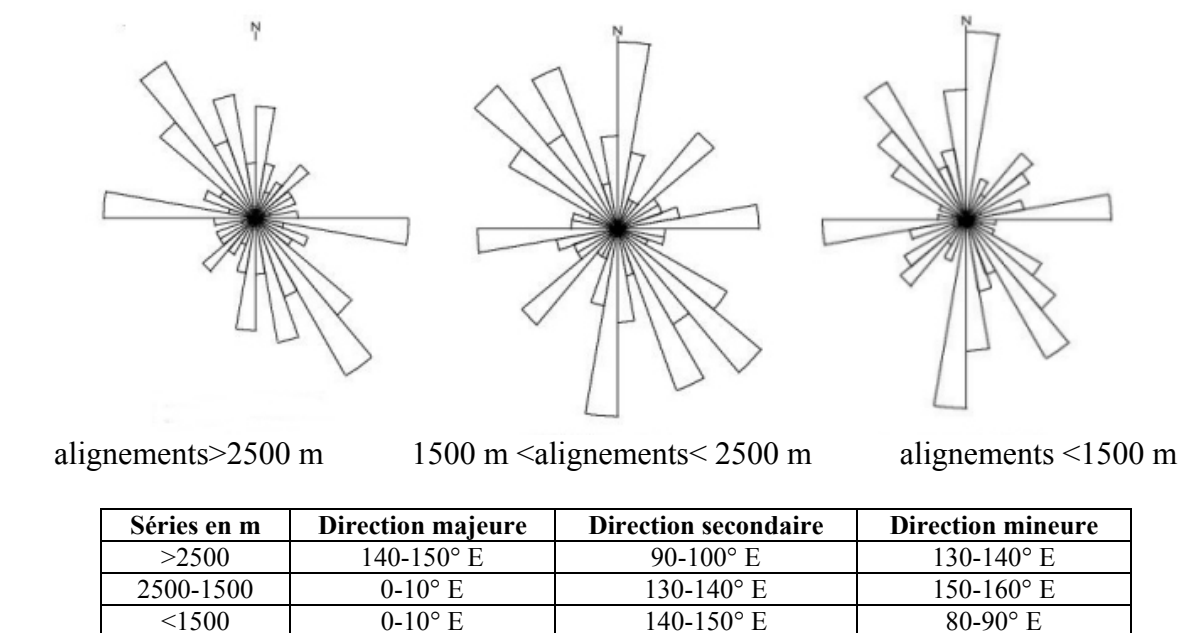


Figure 26 : Directions principales observées pour l'ensemble des documents par différentes classes de longueur.

Les trois directions principales d'alignements à l'échelle régionale sont N140-150°E, N0-10°E et E-O (Figure 25 - Figure 26).

Les directions N140-150°E, sont les plus importantes en nombre mais aussi en taille. Elles s'apparentent à la famille linéamentaire à laquelle se rattache l'accident Saorge-Taggia (accident principal situé, dans cette analyse, hors de notre zone d'étude). Ces directions sont particulièrement visibles dans les zones qui encadrent à l'est et à l'ouest le chaînon du Férion. Ce type d'analyse confirme donc la position dominante de cette direction structurante dans la région. Le chevauchement Rocca Seira-Ongrand situé à la partie interne de l'arc de Nice (Guardia et Ivaldi, 1996) fait partie de cette famille, toutefois aucune des failles actives reconnues (Larroque *et al.*, 2001) dans notre secteur d'étude n'a cette orientation. Au niveau de la déformation fragile les accidents de cette direction sont présents, pour la plupart, à l'Est de l'accident Monaco-Sospel-Breil-Saorge.

Les directions N0-10°E s'apparentent aux failles Monaco – Gorbio et Sainte Agnès - Sospel ainsi que celle de Peille - Cap d'Ail. Les directions subméridiennes visibles dans la totalité des Alpes-Maritimes sont bien marquées dans la terminaison sud-est du massif de l'Argentera – Mercantour c'est-à-dire en périphérie nord de notre site d'étude. Elles guident la morphologie et les alignements des principaux lacs d'altitude très récents comme ceux des vallées de la Valmasque et des Merveilles (Guardia et Ivaldi, 1996). Elles correspondent à un épisode de diaclasation de la croûte certainement récent compte-tenu de la fraîcheur des marqueurs de la déformation.

Les directions N90-100°E ne s'apparentent à aucune famille linéamentaire connue dans notre zone d'étude. Elles sont par contre connues plus au nord avec la zone décrochante du bord sud de l'Argentera qui s'étend de Belvédère à Carmo Gerbontina (Ivaldi *et al.*, 1986 ; Guardia et Ivaldi, 1996). Elles sont surtout mises en évidence sur le MNT, car les ombres portées sur les images satellitales par le relief fractionnent les alignements de cette direction. Concernant les directions des alignements majeurs (>2500m), ces directions N90-100°E ne représentent en nombre qu'une direction secondaire.

En résumé :

- les directions N140-150°E sont majeures dans la classe des alignements de longueur supérieure à 2500 m ;
- les directions N0-10°E sont dominantes dans les classes inférieures ;
- les directions N90-100°E apparaissent clairement comme des directions majeures sur le MNT et secondaires dans la classe des alignements supérieurs à 1500 m sur l'ensemble des traitements.

La méthodologie adoptée dans cette étude a permis de retrouver les principales directions structurantes connues de la zone d'étude. La cohérence des résultats valide cette méthodologie. La fracturation régionale est ainsi mise en évidence par la détermination des directions principales issues du traitement statistique de l'ensemble des alignements. Un classement quantitatif des directions structurantes a fait ressortir les directions principales d'alignements N140-N150°E. De plus cette méthodologie a mis en évidence l'importance des directions N90-100°E jusqu'à présent méconnues dans notre zone d'étude.

4.1.1.2. Hiérarchisation des principaux alignements en terme de longueur

Dans cette analyse, les successions d'alignements de même direction ont été regroupées en alignements d'ordre supérieur (Tableau 8). Ces alignements seront interprétés comme les alignements majeurs régionaux.

❖ image Landsat été

Direction en ° E	Longueur en m	Lieu
100	13163	Col Saint Michel - Sospel
150	10391	L'Escarène, Blausasc, Peillon
150	9229	Bendejun (vallée du Paillon)
0	8926	Linéament NS au sud de Sospel
110	8056	Oblique Italie
120	7732	Cros d'Utelle-Férion-Coaraze

❖ image Landsat hiver

Direction ° E	Longueur en m	Lieu
100	9421	Virgation du Paillon (Cantaron)
150	8165	Levens-Tourette Levens
120	7966	Cros d'Utelle – Férion - Coaraze
160	7604	Linéament NS au sud de Sospel
150	6558	L'Escarène, Blausasc, Peillon
145	6328	Bendejun (vallée du Paillon)

❖ MNT

Direction en ° E	Longueur en m	Lieu
100	10105	Col St Michel-Sospel
120	9854	Cros d'Utelle – Férion - Coaraze
165	6842	Linéament NS au sud de Sospel
130	5200	Menton - Baudon
150	4336	Levens – la Vésubie
90	4296	Linéament EW à Peille

Tableau 8 : directions et longueurs des alignements majeurs relevés sur les scènes Landsat (Eté, hiver) et le M.N.T.

Sur la scène Landsat Eté l'alignement le plus important, et un des mieux marqués, est celui qui s'étend du col Saint-Michel près de Duranus, dans la Vallée de la Vésubie, jusqu'à Sospel. Seule une partie de cet alignement N100°E est visible sur la scène Landsat hiver (la limite septentrionale de cette scène se situe plus au Sud que celle de l'été) et n'y est donc pas prise en compte. L'alignement le plus important de la scène Landsat hiver est celui de direction N100°E au niveau de Cantaron qui semble perturber les 2 branches du Paillon et qui se poursuit jusqu'à Beausoleil. Sur le MNT cette structure linéaire composée d'une succession de petits alignements y apparaît nettement. Il sera dans la suite de cette étude nommé alignement de Paillon-Monaco.

4.1.1.3. Etude de la réalité tectonique des principaux alignements régionaux mis en évidence

La réalité tectonique des principaux alignements y est ici discutée en fonction de la netteté des informations issues de cette analyse géomatique (Figure 36).

- a) le faisceau d'accidents N0-10°E composites Monaco – Sospel est bien connu dans la littérature comme étant l'accident sub-méridien majeur de la région marquant la limite orientale de l'arc de Nice. Cet accident est visible mais peu marqué sur les diverses images et MNT traités. Aucune sismicité n'a été enregistrée à ses abords contrairement à l'accident N40°E Breil-Saorge situé dans sa continuité septentrionale (Hoang Trong *et al.*, 1987).
- b) Le double accident Peille – Cap d'Ail et Peille – Laghet – Eze est également connecté dans sa partie septentrionale au grand linéament N40°E Roya – Bévéra – Basse vallée du Paillon (dont fait partie l'accident Breil-Saorge) par une succession de failles (Ritz, 1992).

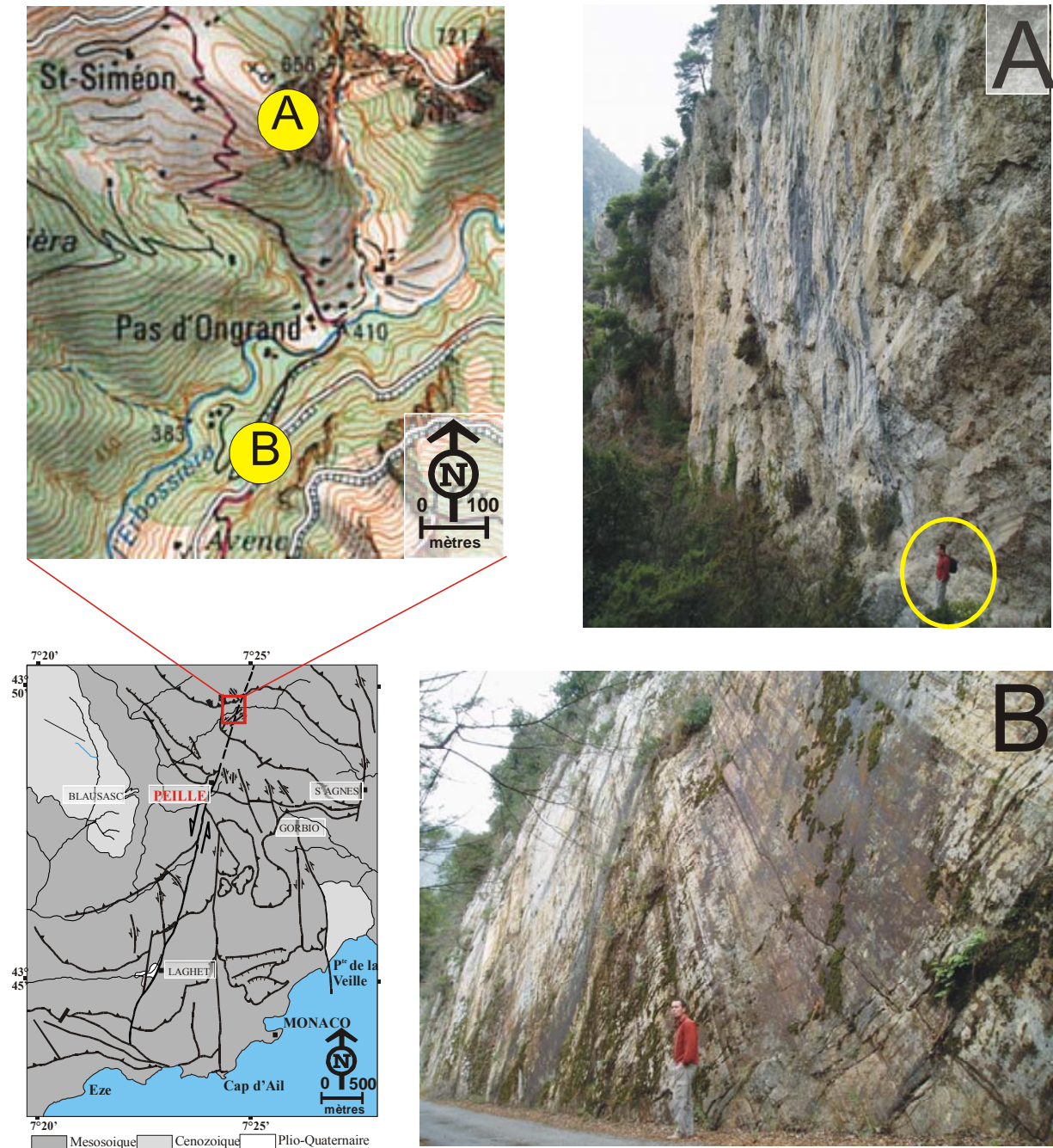


Figure 27 : Imposants miroirs de faille dans le prolongement nord supposé de l'accident de Peille-Laghet dans le vallon de la source du Rivet (A) et près de Virounours (B).

Ces accidents sont visibles mais peu marqués sur les différents documents traités. Rappelons que l'amas de séismes de la crise sismique de Blausasc se trouve à l'emplacement de l'actuel cours du Paillon de 2 à 3 km à l'Ouest de ces accidents (Courboulès, 2003). La continuité supposée de cet accident au nord de Peille (Charreau, 2002) n'est pas visible sur les différents documents. De même les imposants miroirs de faille de Virounours et des gorges de La source du Rivet (Figure 27) y sont invisibles. Nous avançons comme hypothèse que ces accidents représentés par ces miroirs de faille pluridécamétriques n'ayant pas joué récemment, leur environnement immédiat n'a plus été perturbé. La conséquence est que la trace de ces « vieux » accidents a été gommée du paysage et est invisible par les analyses géomatiques.

c) l'accident N120-140°E Cros d'Utelle – Férion – Coaraze, bien connu dans la littérature (Gèze, 1968) est l'accident le plus marqué de tout le secteur. Sa terminaison sud-est ne semble pas se prolonger en direction de Monaco ni au niveau de l'observation des alignements sur les images satellitales et les MNT ni au niveau de la déformation fragile finie.

d) les trois alignements N130-150° E guidant le réseau hydrographique du Paillon.

- L'alignement cime de la Blanchière – Blausasc – Peillon. Dans sa partie Nord il coïncide avec le ruisseau de Fighière. Il prolonge ensuite le flanc oriental du synclinal de Contes puis il rejoint une faille mineure au niveau de Peillon. Cette faille mineure coupée dans son extrémité orientale par la faille de Peille-Laghet fait également partie de l'accident actif N130°E Contes – Peillon mis en évidence lors de la crise sismique de Blausasc en décembre 2000 (page 42). Ces deux accidents qui encadrent le synclinal de Contes font partie de la même famille linéamentaire N130-150°E et peuvent donc être considérés comme actifs. Toutefois leur extension géographique limitée ne semble pas pouvoir être à l'origine d'un séisme de magnitude importante.
- L'alignement Bendejun – Contes, sur lequel est installée la branche du Paillon de Contes, influence la morphologie mais n'est pas reconnu comme accident tectonique.
- L'alignement « Levens – Tourette-Levens » sur le côté Ouest de la chaîne du Férion est formé d'une succession de petites failles (Gèze, 1968). Il est situé 2 km à l'Est de l'accident N150°E de St Blaise – Aspremont dont l'activité a déjà été démontrée (Tableau 3). La remobilisation de ce dernier pourrait entraîner celle de l'alignement « Levens – Tourette-Levens ».

e) Les directions EW sont actives à toutes les époques dans les Alpes maritimes franco-italiennes, et ce depuis le permien. Elles ont influencé la paléogéographie, la sédimentation et la tectogénèse notamment la mise en place des nappes alpines au cours du Paléogène. L'accident le plus connu est localisé en bordure sud de l'Argentera entre Belvédère et le Carmo Gerbontina (Ivaldi et Guardia, 1986, 1987 ; Guardia et Ivaldi, 1996). Deux alignements de même direction ont été individualisés dans notre zone d'étude aux latitudes respectives de Sospel et de Monaco.

*** l'alignement N100°E Col St Michel - Sospel**

L'analyse des traitements des images satellitales et du M.N.T. révèle l'existence d'un important alignement orienté en moyenne N100°E entre le Col St Michel et Sospel. Cet alignement est situé, au plus près, à 16 kilomètres de Monaco et sa partie visible a une longueur de plus de 20 kilomètres. Il n'est pas répertorié comme accident tectonique dans la littérature géologique actuelle.

Il peut s'agir d'un alignement sans valeur géologique ou d'un accident tectonique à jeu ou rejeu récent, marquant fortement la morphologie sans pour autant décaler nettement les structures géologiques. L'objectif est ici de lever cette incertitude.

Sur les photographies aériennes au niveau du Col Saint Michel sont visibles deux types d'accidents : d'une part, le chevauchement de la Rocca Seira, orienté N155°E et d'autre part, des accidents plurihectométriques orientés N90° à N100°. Parmi ces derniers figurent :

- l'accident de Roccasparviera – Auriéras – col St Roch
- la faille du col Saint Michel très visible dans le paysage et qui recoupe de nombreuses structures à l'emporte pièce (Diracca, 1999).

Ces accidents, situés quelques centaines de mètres au Nord de l'alignement N100°E Col Saint Michel - Sospel, font probablement partie du même couloir de failles.



Figure 28. Partie occidentale de l'alignement N100°E Col Saint Michel – Sospel marquant fortement la morphologie sur image Spot.

L'alignement N100°E est décelable d'Ouest en Est dans les secteurs suivants (Figures 28-29)

- son passage au Col de Huesti (Nord du Cros d'Utelle) est assez net,
- la Vésubie a son cours descendant NS dévié vers le Sud Ouest à son passage,
- le prolongement de cet alignement est visible dans la partie inférieure du vallon de Duranus et ce jusqu'au Collet de St-Esprit puis jusqu'à la tête de Miamande à environ 500 m au Sud du col Saint Michel,
- un interfluve séparant les vallons de Campon au Nord et de Villard au Sud marque sa présence, puis il se poursuit jusqu'au Paillon de Contes qui présente une virgation de son cours vers l'Ouest à son passage,
- cette structure linéaire est bien visible des deux côtés du col de Savel puis jusqu'au village de Lucéram,
- à 1 km environ au nord-ouest du col de Braus, cet alignement apparaît clairement en décalant toujours vers l'Ouest la partie Sud de la crête de Montauri (Figure 30), puis se prolonge jusqu'au bassin Est-Ouest de Sospel, avant de disparaître progressivement en direction de l'Est.

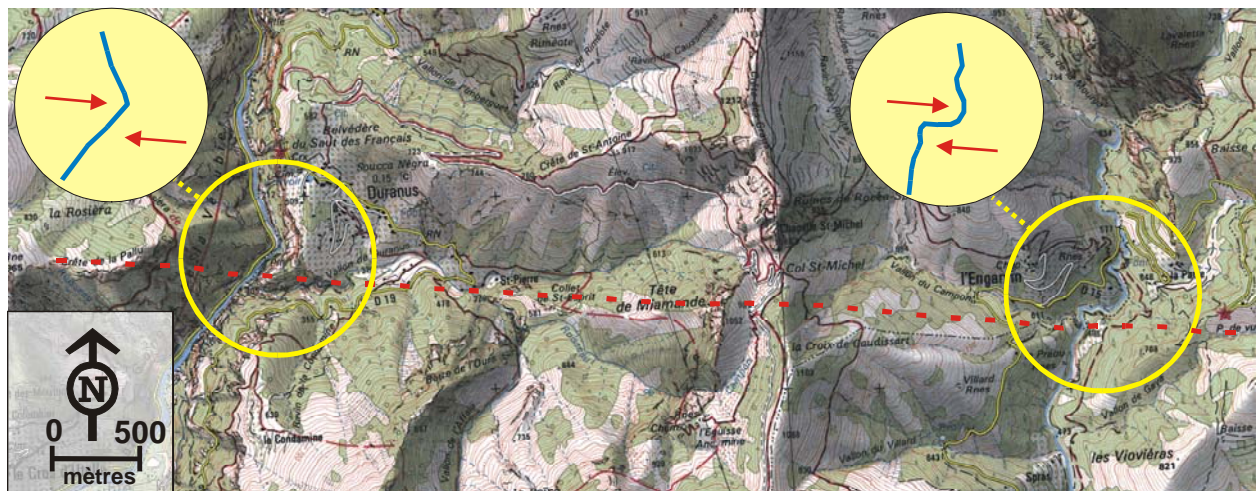


Figure 29 : Tracé de l'alignement N100°E à partir de l'analyse des images satellitales sur fond topographique de la carte IGN au 1/25.000°.

L'alignement N100°E du "Col Saint Michel - Sospel" marque donc la morphologie par des déviations de cours d'eau (Vésubie, Paillon de Contes), par des cols (collets col de Huesti, Saint Esprit, Savel) et par des ruptures de pente importantes qui sont l'indice d'une réalité tectonique.

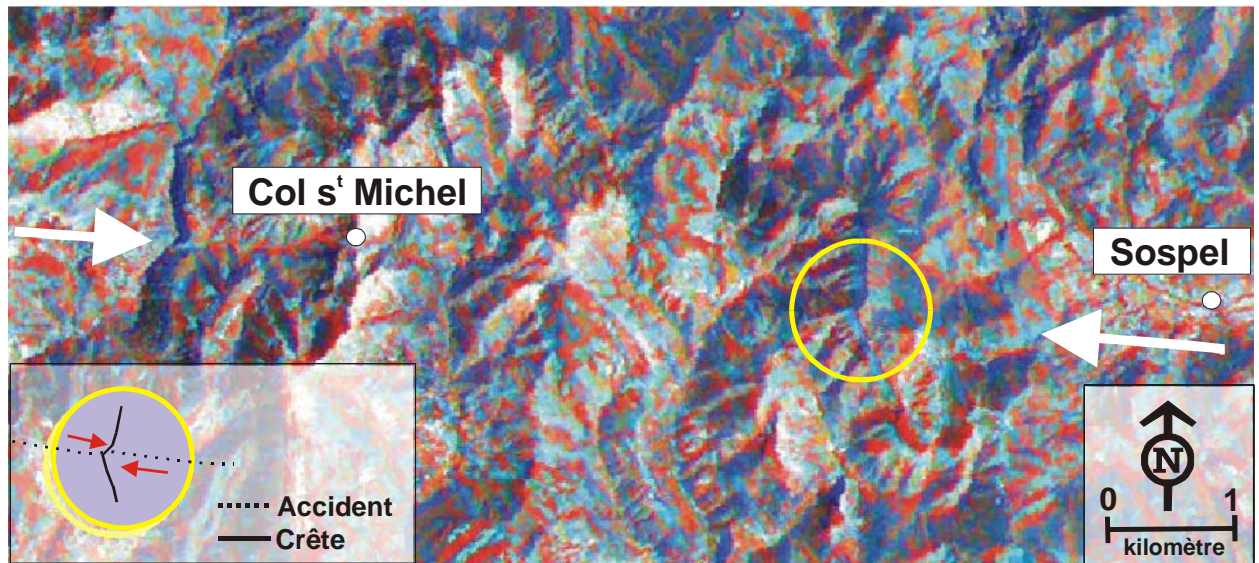


Figure 30 : Mise en évidence du décalage de la crête de Montauri au passage de l'accident Col Saint Michel – Sospel sur traitement d'image Landsat © Eosys –DEUC.

L'analyse structurale à l'échelle cartographique permet de faire un certain nombre d'observations :

D'Ouest en Est, l'alignement N100°E est souligné par les caractères géologiques suivants :

- un affleurement de poudingue Plio-Quaternaire de direction moyenne Est-Ouest situé à un peu plus de 1000 m d'altitude au collet d'Huesti (Vernet 1981; Geze,1968),
- des terminaisons brutales d'écaïlles (terminaison Nord-Est de l'écaïlle de Castellar entre Vésubie et Férion, limite des écaïlles des rochers de Miamande et de l'Autaret plus à l'Est, enracinement méridional de la Rocca Seira).
- individualisation en partie due à l'érosion du synclinal du Savel, à cœur Paléogène, par rapport au synclinal de Peira-Cava.

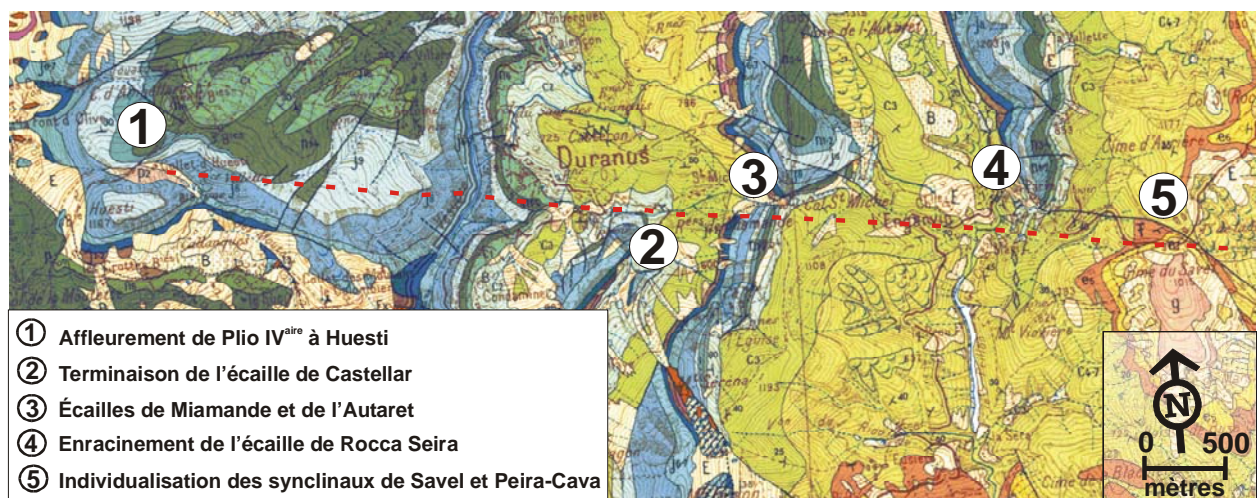


Figure 31 : Tracé de l'alignement N100°E sur carte géologique au niveau du Col Saint Michel (fond cartographique : feuille Menton – Nice 1/50.000°, Gèze, 1968)

A l'échelle de l'affleurement, l'alignement N100°E du "Col Saint Michel - Sospel" est souligné par d'importantes ruptures de pentes vers le Nord et vers le Sud et également par de très nombreuses failles de même direction. Citons parmi elles, les failles décamétriques à hectométriques qui découpent à l'emporte pièce le front de l'écaille de la Rocca Seira, et en direction de l'Est les failles qui marquent la terminaison nord du synclinal du Col de Braus.

Des indices de terrain ont été recherchés le long de cet accident, notamment dans les terrains éocènes marneux (Figure 32). Ces terrains souples et facilement érodables ont tendance à amortir les failles (exemple la faille Monaco-Sospel amortie dans les marnes Crétacé du bassin de Gorbio). Si des indices géologiques sont présents, ils attesteraient d'une faille récente et probablement active.

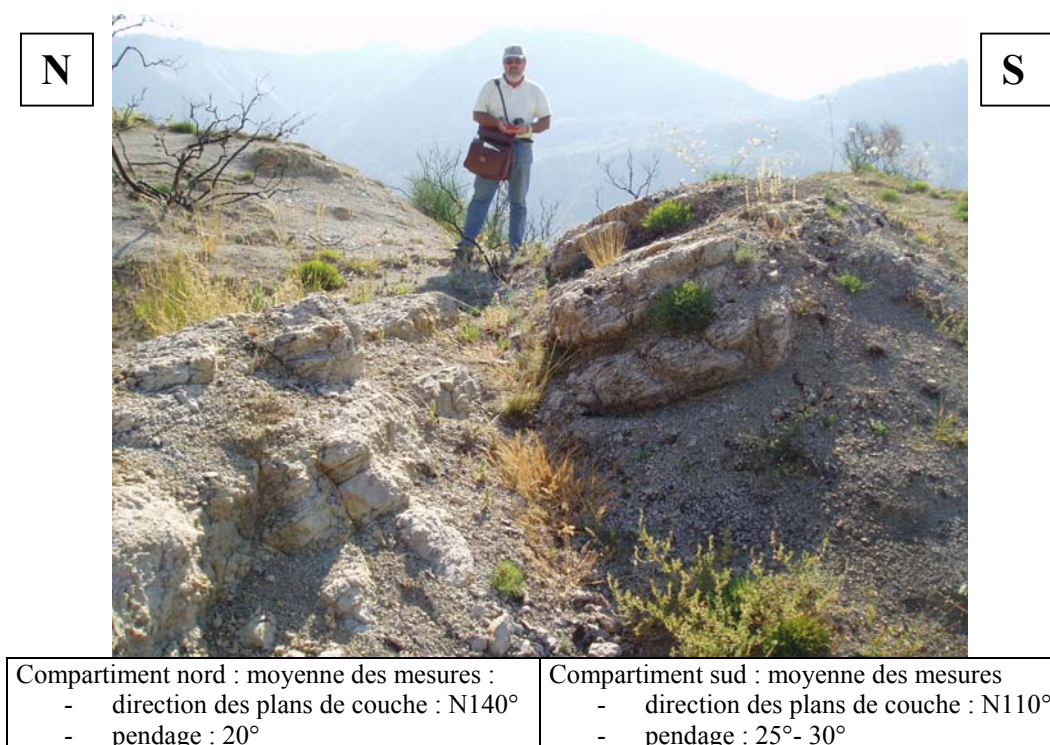


Figure 32 : Passage d'un accident Est-Ouest dans les marnes grises du Priabonien supérieur à l'Ouest de Lucéram avec décalage du compartiment nord par rapport au sud. La crête de Montauri est visible à l'arrière plan.

Plusieurs indices ont été observés :

- des traces de fracturations qui se placent sur cette ligne de vallon, sans cassure mais avec des inflexions très nettes ;
- des décalages de bancs et des affaissements du compartiment sud par rapport au compartiment nord sur une ligne globalement Est – Ouest.

Parmi les indices présents, des accidents EO ont été relevés alors qu'ils sont peu répandus à cette latitude dans l'arc de Nice. De plus les directions régionales N150°E dextre et N50°E senestre d'accidents sont fréquemment perturbées par ces accidents Est – Ouest. Vers Lucéram sur le tracé de cet alignement, de nombreux glissements de terrains ont été observés (Comm. orale Perez, 2004) et pourraient trouver leur origine dans les ruptures de pentes dues à

cet accident. Ces traces même ténues peuvent marquer un accident plus profond dont le jeu récent offre quelques indices de surface même dans des terrains souples.

Le paléojeu de cet accident déduit de l'analyse morphostructurale est dextre dans la grande majorité des cas.

La structure linéaire N100°E révélée par l'analyse des images satellitales et du M.N.T. présente des caractères morphologiques, structuraux et microstructuraux qui permettent de conclure à sa nature tectonique.

*** L'alignement N100° Paillon - Monaco**

Moins étendu et moins marqué que le précédent, il débouche dans sa partie orientale sur Monaco et mérite toute notre attention.

L'alignement est assez visible sur les images Spot et Landsat, ainsi que sur le M.N.T au 1/5.000°. Contrairement à l'accident "Col Saint Michel - Sospel" qui apparaît comme continu, l'alignement "Paillon - Monaco" se présente comme une succession de segments disjoints mais alignés suivant une direction moyenne N100-110°E qui marquent peu la morphologie (Figure 33). Seul le cours du Paillon d'orientation EW à l'Ouest de Ste Thècle se calque sur cet accident. Ces segments se succèdent depuis la confluence des Paillon de Contes et de l'Escarène aux lieux dits "Pont de Peille - La Condamine" jusqu'à la Turbie au niveau du col de Guerre.

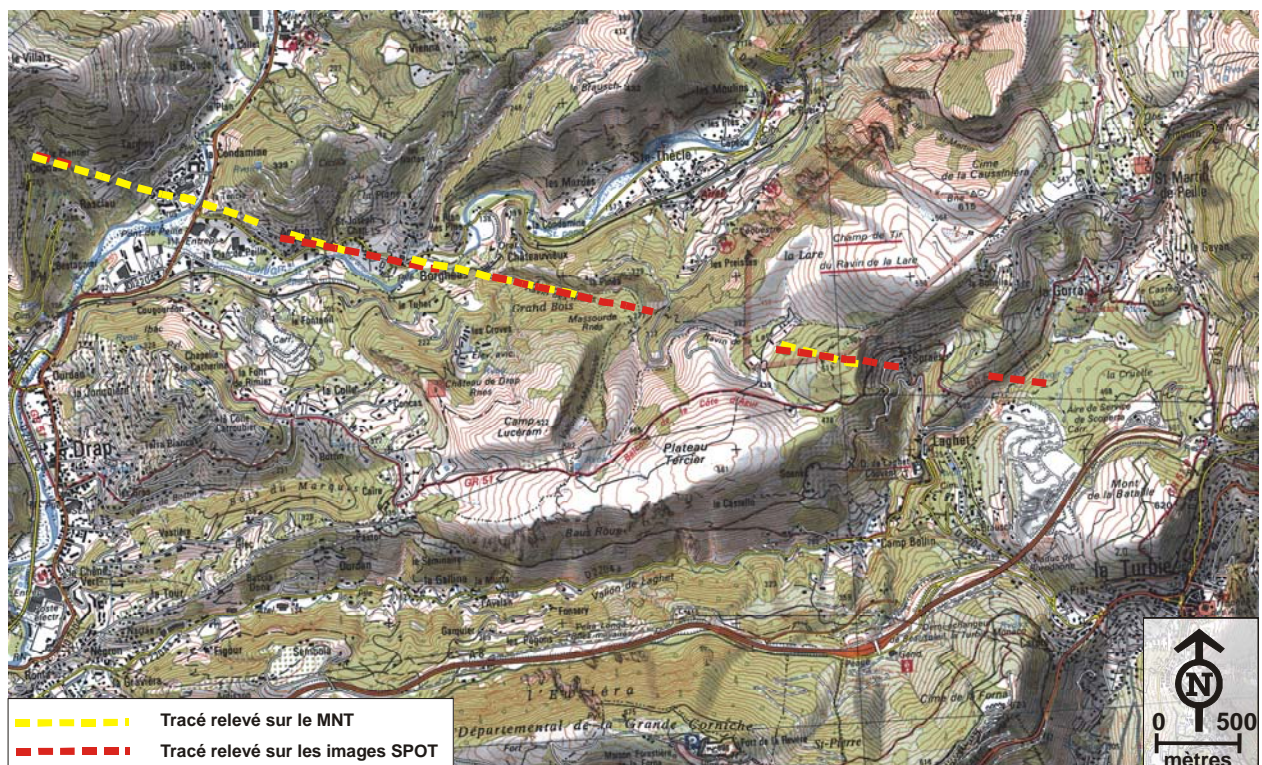


Figure 33 : Localisation de l'alignement N100°E "Paillon-Monaco" sur carte topographique I.G.N. Menton-Nice au 1/25.000°.

La continuation de l'alignement en direction du bassin versant de Monaco est moins nette, hormis sur le versant méridional du Mont Agel où un segment plurihectométrique, légèrement décalé vers le nord, y est nettement visible sur le M.N.T. (Figure 34).

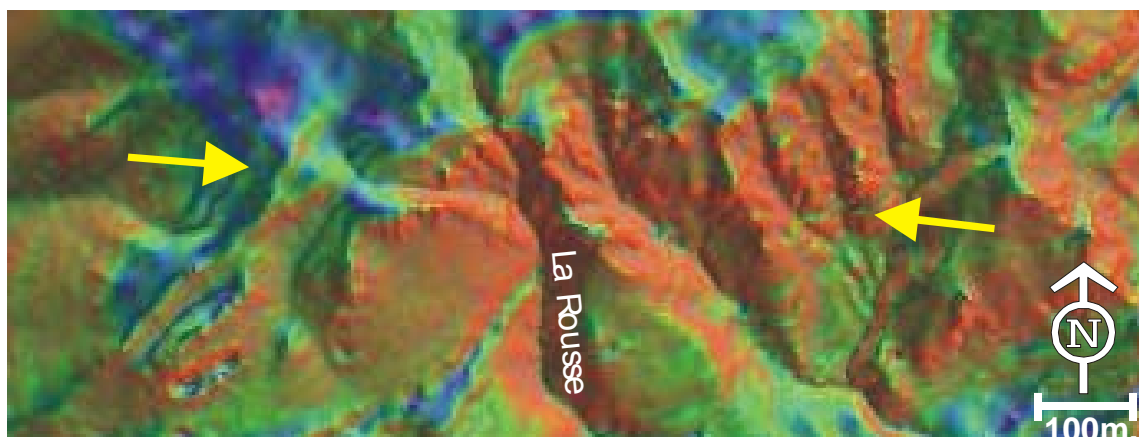


Figure 34 : Vallon de la Rousse et talwegs NS du versant méridional du Mont Agel perturbés par le passage de l'extrémité orientale de l'alignement Paillon-Monaco N100°E sur le MNT au 1/5.000° © Eosys –DEUC.

Ce segment correspond à la branche Ouest de la partie amont du vallon de "La Rousse" au lieu dit du "Pont des demoiselles". Il s'agit d'un accident qui affecte les écailles frontales situées sous le chevauchement du mont Agel (Figure 35).

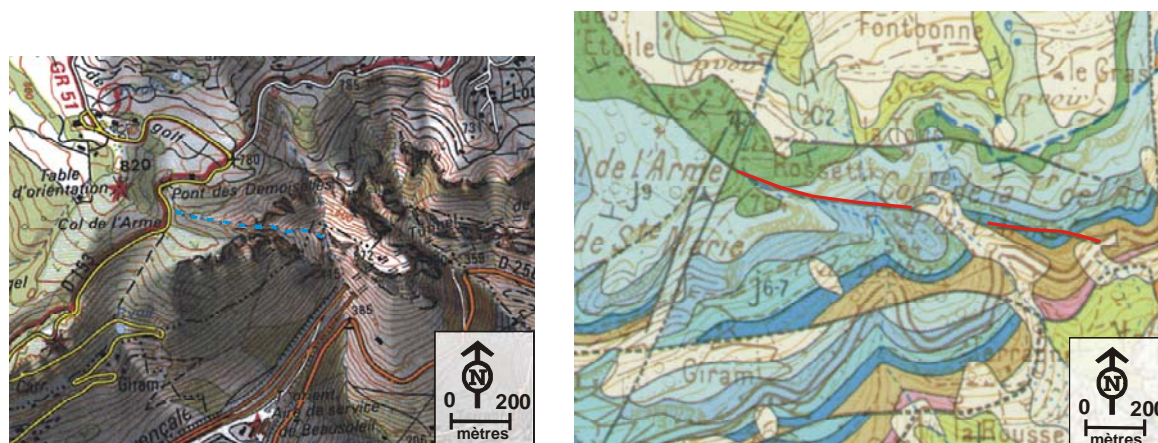


Figure 35 : L'accident N100°E du Vallon de La Rousse sur le versant méridional du Mont Agel sur fond de carte topographique (IGN Menton-Nice au 1/25000° et sur fond de carte géologique (feuille Menton-Nice 1/50.000°, Gèze, 1968).

A l'échelle cartographique, l'alignement "Paillon - Monaco" n'affecte qu'assez peu les structures géologiques qu'il recoupe, contrairement à l'accident du "Col Saint Michel - Sospel".

Nous pouvons toutefois relever d'est en ouest :

- la faille transverse du vallon de la Rousse,
- la faille du lieu dit "La Gorre" qui affecte la terminaison Nord de l'écaille du mont Bataille,
- l'existence des brèches de "Spraès" attribuées au Plio-Quaternaire à son intersection avec l'accident de "Peille - Laghet",

- la présence d'une faille N110°E au niveau du tunnel de La Condamine. Cette faille pourrait être à l'origine de l'important ressaut de près de 10 m de la terrasse alluviale mis à jour par les données des sondages réalisés pour l'étude géologique de ce tunnel (Ivaldi, 2003).

Les études morphostructurales, cartographiques et microstructurales démontrent que l'alignement mis en évidence par analyses toponumériques et satellitales a une valeur tectonique. Cependant les marqueurs morphologiques et tectoniques de cet accident sont d'apparence moindre que leurs homologues des accidents "Col Saint Michel - Sospel" et "Belvédère Carno Gerbontina".

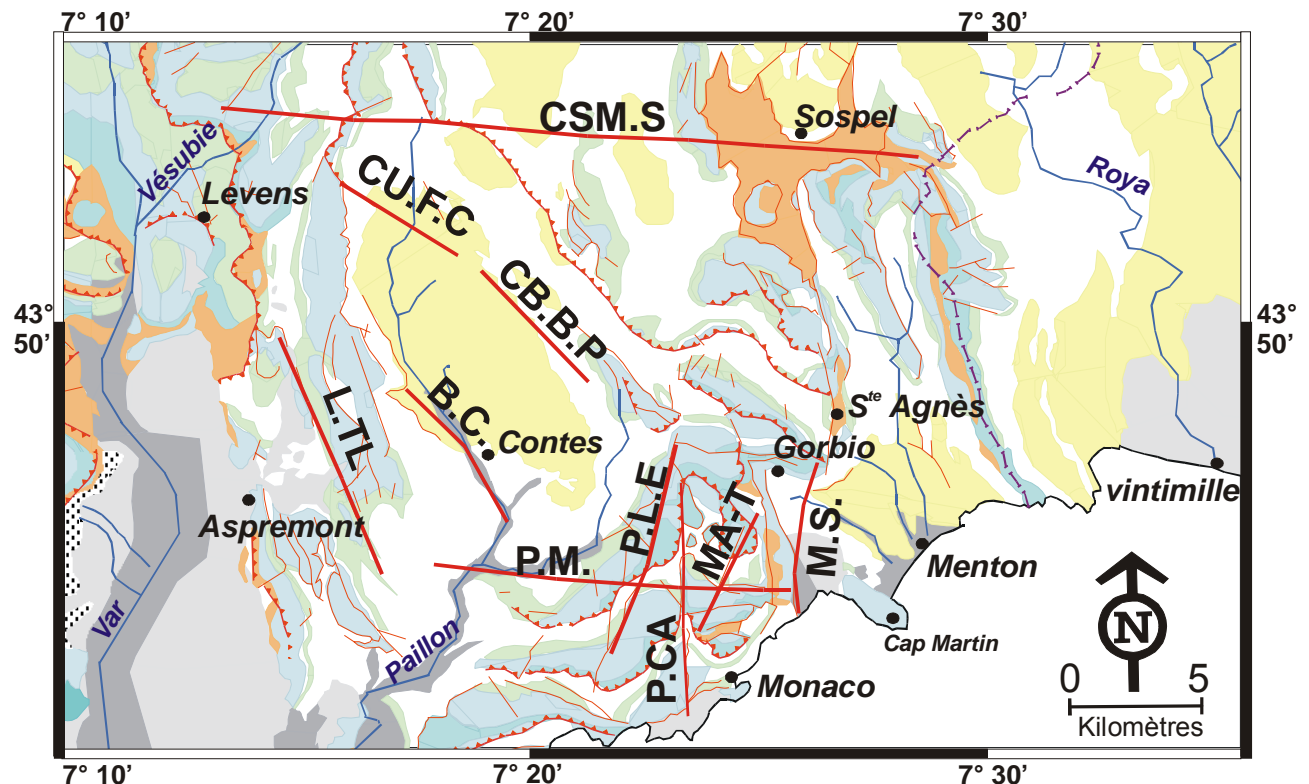


Figure 36 : Principaux alignements reportés sur carte géologique au 1/50.000° : CU.F.C : Cros d'Utelle - Férier - Coaraze ; L.T.L : Levens-Tourette - Levens ; B.C : Bendejun - Contes ; CB.B.P Cime de la Blanchière - Blausasc - Peillon ; P.M. : Paillon-Monaco ; P.L.E Peille - Laghet - Eze ; P.CA Peille - Cap d'Ail ; MA-T : Mont Agel - Turbie ; S.D : Sainte Devote ; M.S : Monaco - Sospel ; CSM-S : Col Saint Michel - Sospel.

4.1.2. Domaine marin

La qualité du MNT marin ne permet pas une analyse fine des alignements. On peut tout de même observer d'importantes vallées NS qui prolongent les zones de fracturation NS rencontrées à terre et qui coupent les vallées NO-SE. La zone de fracturation de Monaco – Sospel, limite orientale de l'arc de Nice, se poursuit très nettement au travers d'un canyon sous-marin (Figure 37).

Les données bathymétriques proches (Campagne Pirelli, 1995) mettent en évidence un canyon très prononcé d'orientation N140°E. Le manque de données au sud et à l'est de ce canyon ne permet pas de conclure sur son comportement à l'approche de la continuité marine de l'accident Sospel-Monaco.

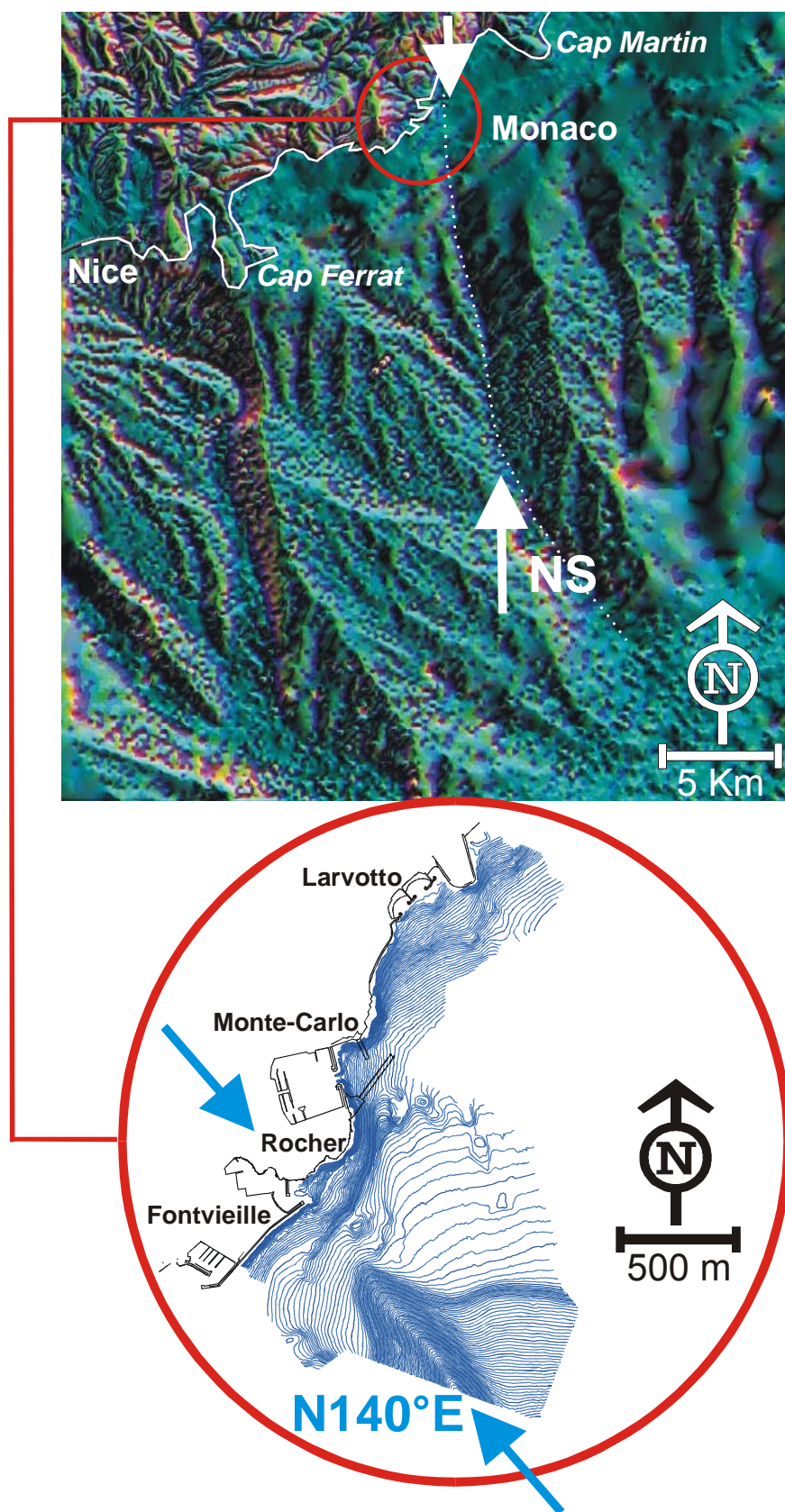
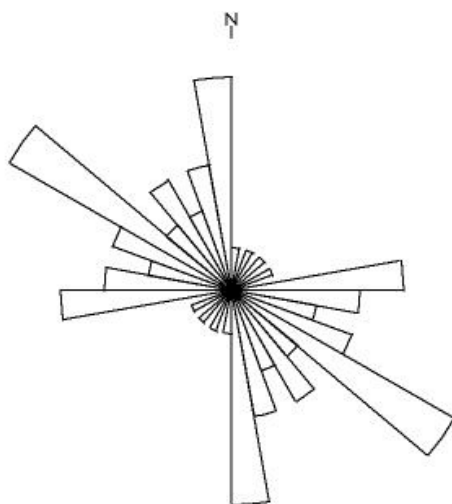


Figure 37: Les canyons sous-marins, le NS dans le prolongement de l'accident sub-méridien Sospel-Monaco mis en évidence sur le MNT marin – © Eosys – DEUC, et le N140°E très prononcé au large de Fontvieille (Campagne Pirelli, 1995).

Les directions d'alignements principales N-S et NO-SE sont identiques à celles du domaine terrestre. Elles présentent le même classement (Figure 38) que celles rencontrées à terre. Elles sont essentiellement dictées par l'orientation des vallées sous-marines.



Documents	Direction Majeure	Direction secondaire	Direction mineure
MNT marin	140-150° E	170-180° E	80 - 90° E

Figure 38 : Directions principales d'alignements observés sur le M.N.T marin au 1/25.000°.

L'analyse du MNT a mis en évidence, dans le secteur d'étude, deux domaines distincts avec à l'Ouest les vallées NO-SE et à l'Est des vallées NS, reconnues jusqu'au large de San Remo (Chaumillon, 1994). Cette frontière, marquée par un canyon dont la continuité est l'accident Sospel-Monaco confirme l'importance structurale au niveau régional de cet accident majeur. Nous avançons l'hypothèse que le canyon N140°E beaucoup plus prononcé, et appartenant à la famille de vallées NO-SE, pourrait signer la présence d'un accident plus récent que la prolongation de l'accident NS Sospel-Monaco. Cette hypothèse devrait être confirmée par l'obtention de données bathymétriques supplémentaires. En conclusion, la Principauté de Monaco est située à terre, comme en mer à la frontière de deux domaines structuraux bien délimités.

4.2 . Les familles d'alignements d'extension locale

La fracturation crustale du site de Monaco a été établie à partir de l'analyse conjointe des images satellitaires et d'un M.N.T. composite terre - mer au 1/5.000° (Figure 39).

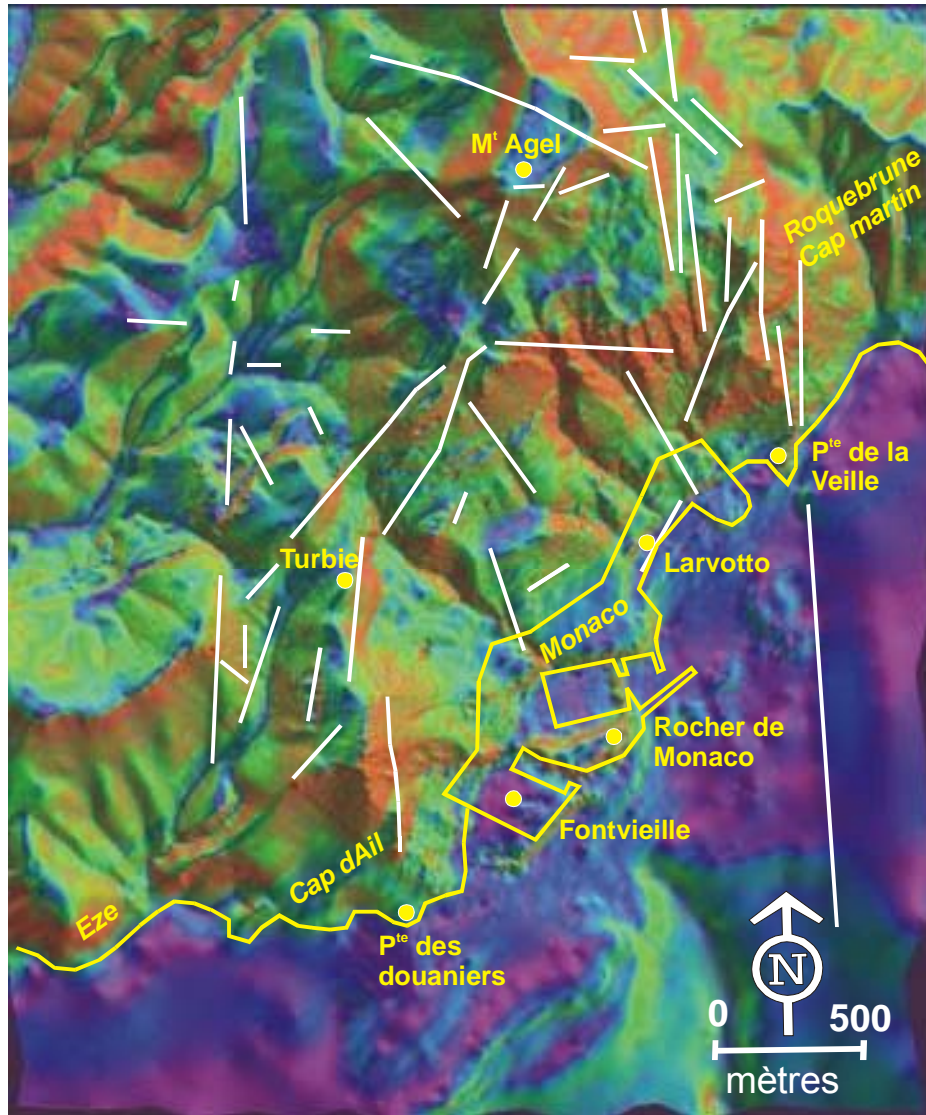
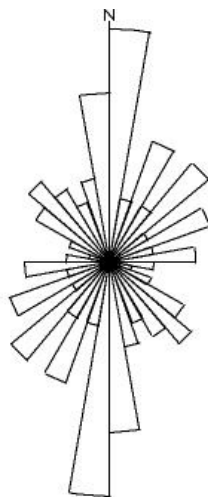


Figure 39 : Les alignements tracés sur le traitement MNT au 1/5.000^e du Bassin Versant de Monaco
© Eosys – DEUC.

- Les directions NS dominent la fracturation du site de Monaco (Figure 40) contrairement à la fracturation régionale. Ceci s'explique par la présence de deux directions structurantes majeures sur le secteur de Monaco : à l'est de Monaco, la zone de fracturation Monaco – Gorbio, et à l'ouest l'accident Cap d'Ail – Peille. L'accident principal en terme de longueur est la zone de fracturation de Monaco – Gorbio qui semble se prolonger en mer d'après le MNT marin.
- La direction N40°E est représentée par une faille kilométrique qui découpe les structures écaillées du bassin versant de Monaco depuis le Mont Agel jusqu'à la Turbie avec une continuité probable sur Cap d'Ail. Cette faille pourrait être à la fois un relais entre les deux accidents de Sospel – Monaco et de Peille- Cap d'Ail et aussi une faille satellite du grand linéament Roya – Bévéra – basse vallée du Paillon. La faille du Larvotto appartient également à cette famille. Elle est interrompue par l'accident nord-sud de Monaco – Gorbio.

- Les directions N130-150°E sont notamment représentées par un alignement au niveau du Vallon de Sainte Devote dont la nature tectonique n'a pu être démontrée. La longueur de cet alignement reste de toute manière très limitée, inférieure à 2000 mètres. L'alignement de Ste Devote est interrompu dans sa partie nord par la faille N40°E Mont-Agel – La Turbie.



Documents	Direction Majeure	Direction secondaire	Direction mineure
Traitements au 1/5.000 ^e	0-10° E	170-180° E	130-150° E

Figure 40 : Directions principales observées sur les traitements du M.N.T. au 1/5.000^e du bassin versant de Monaco.

Les accidents principaux de la zone proche Monaco sont :

- L'extrémité méridionale de l'accident Gorbio – Monaco.

Au niveau de l'analyse des images satellitales et du M.N.T., cet accident est visible mais peu marqué relativement à d'autres, surtout dans la zone proche Monaco. Aucun argument ne permet d'affirmer l'activité de l'extrémité méridionale de cet important accident qui traverse Monaco et qui semble se prolonger jusqu'au pied du talus continental (Figure 37).

- L'extrémité double méridionale de l'accident Peille–Cap d'Ail et Peille–Laghet-Eze.

Même si cet accident est moins marqué que le précédent, il doit être pris en compte. La crise sismique de Blausasc (M=3.4) ayant eu lieu à proximité (Figure 16).

- L'alignement du vallon de Ste Devote.

Il est identifié sur les images satellitales et sur le MNT au 1/25.000^e mais peu marqué sur le MNT au 1/5.000^e. Dans tous les cas son extension est très limitée : s'il s'avérait que cet alignement ait une réalité tectonique, son importance resterait mineure.

- La faille NE-SO du Mont Agel – La Turbie.

C'est une faille kilométrique qui découpe les structures écaillées du bassin versant de Monaco depuis le Mont Agel jusqu'à la Turbie. Elle décale des structures géologiques (Gèze, 1968) et

l'analyse des images satellitales montre son extension vers le Sud - Ouest jusqu'à Cap d'Ail. Cette faille satellite du grand linéament Roya – Bévéra – basse vallée du Paillon est un relais entre le faisceau d'accidents de Monaco – Gorbio et la faille de Cap d'Ail – Peille.

La plupart des alignements observés s'avèrent être des failles, les plus importantes étant les extrémités méridionales des accidents régionaux NS de Peille - Cap d'Ail et de Gorbio – Monaco. Les autres accidents, même s'ils ne présentent pas un risque réel pour la Principauté apportent des renseignements dans la compréhension de l'agencement structural et du champ de déformation du site de Monaco.

4.3. Synthèse

La méthodologie mise au point pour la reconnaissance et le traitement statistique des linéaments et failles s'avère efficace. Tout nouveau document peut être rapidement traité et ses résultats intégrés à la base de données développée sur le risque sismique encouru à Monaco. Chaque document traité apporte des informations complémentaires sur la fracturation de la zone d'étude. Certains alignements majeurs ou successions d'alignements ont eu ainsi leur réalité tectonique confirmée.

La plupart des directions tectoniques structurantes des Alpes-Maritimes et des régions limitrophes ont été retrouvées par l'analyse des images satellitales et du M.N.T. D'importants accidents Est-Ouest, non répertoriés dans la littérature géologique, ont été mis en évidence. Si leur activité était démontrée, il conviendrait d'en tenir compte dans la détermination du séisme de référence.

En mer, le M.N.T. établi à partir des données de l'IFREMER n'a pas permis d'assurer avec certitude l'existence de linéaments majeurs. Il semble que le pas de 100 mètres retenu ne soit pas suffisant pour déboucher sur un document performant en matière de reconnaissance de failles et de linéaments à des fins d'analyses sismiques. La morphologie générale a permis d'identifier la continuité de l'accident Sospel-Monaco en mer qui sépare deux domaines structuraux bien délimités.

La phase suivante consistera en une analyse détaillée sur le terrain des principaux accidents mis en évidence par les images satellitaires et les M.N.T. Nous rechercherons dans leur environnement immédiat, d'une part, des indices géologiques notamment les miroirs de faille pour définir les champs de déformations à leurs abords, et d'autre part, des indices sismologiques qui permettraient de les qualifier au niveau de leur activité.

CHAPITRE 4 : ANALYSE STRUCTURALE, MICROSTRUCTURALE ET SISMOTECTONIQUE

L'objectif de cette analyse de la tectonique régionale et de la sismotectonique est de qualifier le fonctionnement et l'activité des accidents mis précédemment en évidence dans les divers traitements satellites et M.N.T.

L'analyse de la microtectonique permettra par l'analyse de nombreux miroirs striés de définir les champs de déformation autour des principaux accidents.

La sismotectonique permettra de déterminer, en fonction des plans de faille mis en évidence lors des calculs de mécanismes au foyer, l'activité de certaines failles mais aussi de définir au mieux l'état de contrainte autour de Monaco.

1. Analyse de la tectonique régionale et locale

1.1. Introduction

L'étude microstructurale des sites localisés autour des principaux alignements a comme objectif la définition des champs de déformation fragile finie des roches et leurs liens avec les grands linéaments régionaux.

1.2. Protocole d'analyse

Un site de mesure est considéré par un unique affleurement d'une dizaine à une vingtaine de mètres d'extension. Afin qu'un site soit validé plusieurs conditions doivent être réunies : sa nature lithologique doit être compatible avec le marquage des stries, le jeu doit être marqué, il doit contenir au moins cinq miroirs de failles. Ces miroirs sont analysés sur le terrain, puis au laboratoire par la méthode des dièdres droits informatisée (Pégoraro, 1972 ; Angelier et Mechler, 1977).

Il est parfois possible de distinguer plusieurs épisodes tectoniques sur un même site, et une chronologie relative selon des arguments géométriques. Ainsi plusieurs sites mesurés dans cette étude présentent un polyphasage déduit d'arguments stratigraphiques (âge des terrains faillés) et de corrélation entre sites (cohérence avec la cinématique des principaux événements tectoniques régionaux).

Chaque site mesuré ou station microtectonique est défini en fonction de son éloignement par rapport à un accident mis en évidence dans l'analyse géomatique.

1.3. Méthodologie

Les mesures sur le terrain permettent de caractériser numériquement l'orientation du plan de faille ainsi que la direction et le sens du glissement (Angelier, 1975). Le vecteur déplacement instantané sur un plan de faille donné par les tectoglyphes (direction de stries, empreintes, cristallisation) correspond à la projection de l'un des axes principaux de la déformation.

Le champ de la déformation fragile peut être représenté par un ellipsoïde à 3 axes qui matérialise les axes géométriques de la déformée :

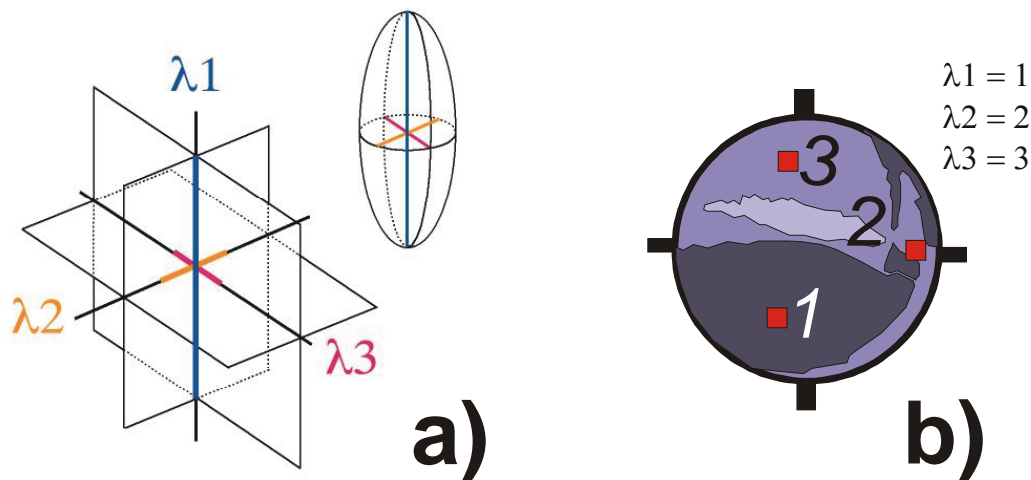


Figure 41 : Représentation du champ de la déformation fragile (λ_1 = axe d'allongement, λ_2 = axe intermédiaire et λ_3 = axe de raccourcissement) : a) sous forme d'un ellipsoïde à 3 axes qui matérialise les axes géométriques de la déformée ; b) sous forme d'un stéréogramme des directions d'allongement (sombre : 100%) et de raccourcissement (clair : 100%), hémisphère inférieur et canevas équisurface.

Les résultats des sites de mesures microtectoniques sont présentés dans cette étude sous forme de stéréogrammes (projections de Schmidt de l'hémisphère inférieur) représentant les champs de déformation et les directions de raccourcissements et d'allongements (Figure 41) sur fond de la carte géologique Menton - Nice au 1/50.000^e (Gèze, 1968).

Plusieurs conditions sont nécessaires pour faire de bonnes mesures (d'après Angelier et Mechler, 1977) :

- la multiplication du nombre des mesures permet de définir au mieux λ_1 et λ_3 ,
- la qualité des mesures avec notamment une attention toute particulière aux miroirs de failles cannelés par exemple où une mesure moyenne est nécessaire et introduite dans le calcul dans un second temps,
- la compatibilité des jeux, pour éviter de concentrer dans un diagramme un mélange de mesures qui correspondraient à des épisodes tectoniques successifs aux mécanismes différents.

1.4. Résultats des mesures de terrains

Plusieurs secteurs ont été identifiés autour de Monaco. Ils ont été choisis d'une part, en fonction de leur localisation par rapport aux principaux accidents mis en évidence précédemment et d'autre part, en fonction des sites de mesures qui présentaient suffisamment de miroirs striés pour être traités. 227 miroirs striés ont été mesurés sur 43 sites sélectionnés. Nous avons de plus exploité les données des miroirs de failles mesurés lors du creusement du tunnel SNCF de Monaco (Perez, 1991) ainsi que celles réalisées par Guardia et Ivaldi (1996).

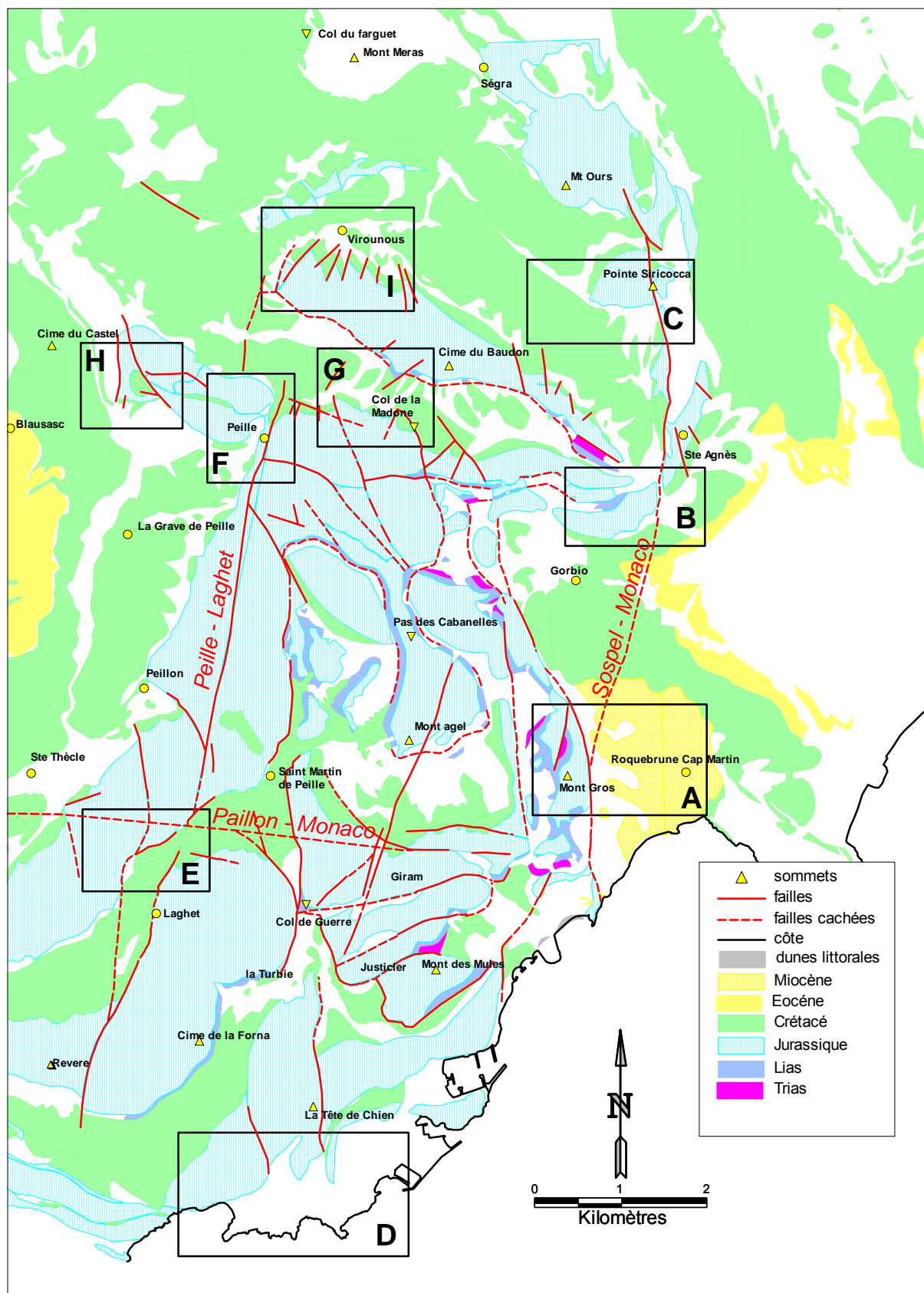


Figure 42 : Localisation des secteurs d'étude sur les principaux accidents entourant Monaco : Monaco-Sospel (A,B,C) ; Peille-Cap d'Ail (DEFGHI) et Paillon-Monaco (E).

1.4.1. Résultats à l'échelle régionale

Les quatre accidents principaux étudiés sont les accidents subméridiens de « Monaco-Sospel » et de « Peille-Laghet » et les deux accidents N100°E de Paillon-Monaco et Col Saint Michel – Sospel. Ce dernier, plus éloigné de Monaco, présente une grande taille et une fraîcheur de sa trace révélée par l'analyse géomatique. Il sera à ce titre également étudié.

1.4.1.1. Accident de Monaco-Sospel

Trois secteurs référencés A,B,C ont été individualisés le long de cette bordure définie par des fractures de direction NS et NNE-SSO (Figure 42) parmi lesquelles la zone faillée NS joignant la Pointe de la Veille à Gorbio et celle NNE-SSO du Larvotto.

a) Secteur A de Roquebrune - Cap Martin – versant Est du Mont Agel

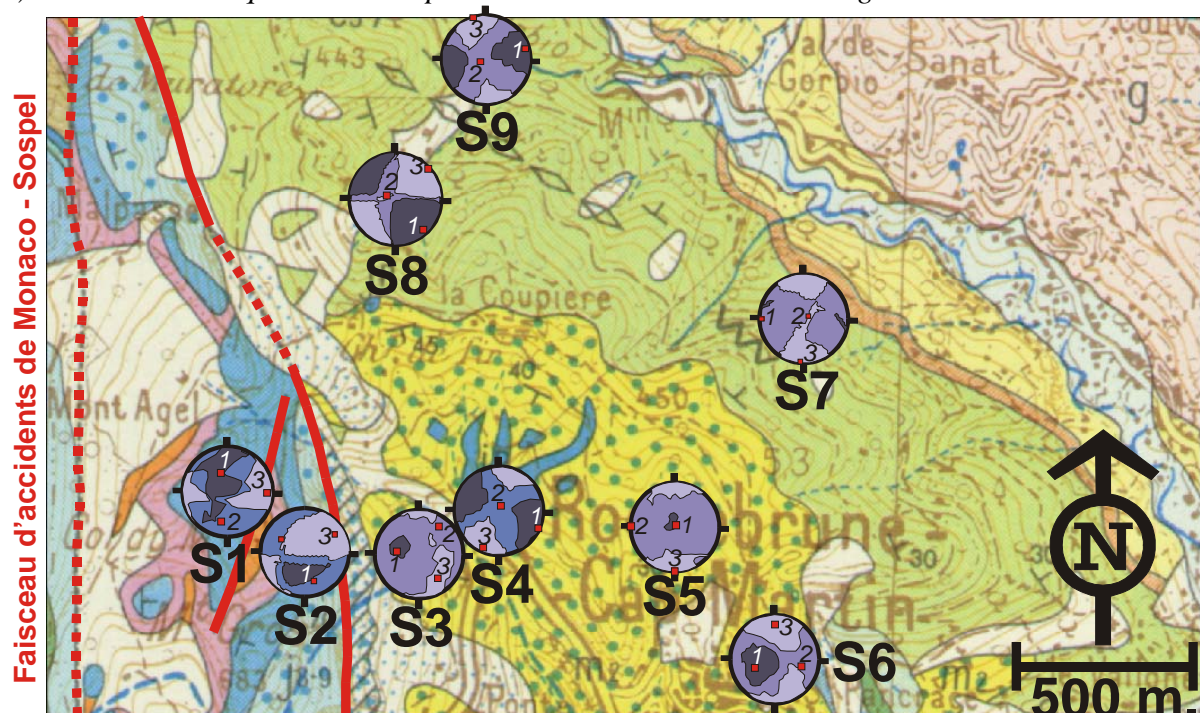


Figure 43. Paléochamps de déformation dans le Miocène, le Crétacé et le Jurassique du secteur A, (fond cartographique : feuille Menton – Nice 1/50.000^e ; Gèze, 1968)

Dans ce secteur la limite Est de l'arc de Nice a une orientation générale subméridienne. Les stéréogrammes obtenus sur les neuf sites de ce secteur d'étude peuvent être classés en deux familles (Figure 43) :

- une famille (stéréogrammes S8, S4, S2), pour laquelle la direction de raccourcissement (λ_3) est NE-SO, la direction d'allongement (λ_1) NO-SE. Un tel champ de déformation fragile peut être mis en correspondance avec les champs de la déformation ductile responsables de la genèse des plis NO-SE post-priaboniens et anté-miocènes. Ces derniers sont notamment représentés par l'anticlinal du Cap Martin cacheté par le poudingue du Miocène de Roquebrune daté du Burdigalien à mi-Langhien (Pécheux, 1979). Des raccourcissements NE-SO appliqués aux accidents NNE-SSO de la bordure Est de l'arc de Nice impliquent un jeu dextre anté-miocène de ces accidents. La faille NE-SO du Mont Gros doit être classée

dans cette famille d'accidents compte tenu des miroirs striés relevés sur le versant Nord du Mont Gros (S1) qui fournissent un raccourcissement (λ_3) EO. Dans notre interprétation la faille du Mont Gros est la continuité de la faille du Larvotto (page 114).

- une famille (stéréogrammes S6, S7, S5, S9, S3), pour laquelle la direction de raccourcissement (λ_3) est N-S. Cette famille plus récente, d'âge aquitainien à actuel, matérialise une rotation anti-horaire de la direction de raccourcissement à l'approche de la bordure décrochevauchante de la bordure Est de l'arc de Nice. Des raccourcissements NS appliqués aux accidents NNE-SSO de la bordure Est de l'arc de Nice sont compatibles avec le jeu senestre de ces accidents, intervenu après le dépôt des grès d'Annot, tel qu'il a été déduit et évalué à 3 km (Ivaldi, 1973 ; Guardia et Ivaldi, 1986).

b) Secteur B de Ste Agnès

A Ste Agnès, la bordure orientale de l'arc de Nice présente également une direction générale sub-méridienne en relais à droite par rapport à la même bordure dans le secteur A.

Les stéréogrammes obtenus sur les six sites de ce secteur d'étude peuvent être également classés en deux familles (Figure 44) :

- une famille (S10, S11, S15), caractérisée par une direction de raccourcissement NO-SE qui fait jouer les accidents subméridiens en décrochement senestre.
- une famille (S12, S13, S14), caractérisée par une direction de raccourcissement (λ_3) NNE-SSO, qui induit des mouvements décrochants dextres sur les accidents N-S.

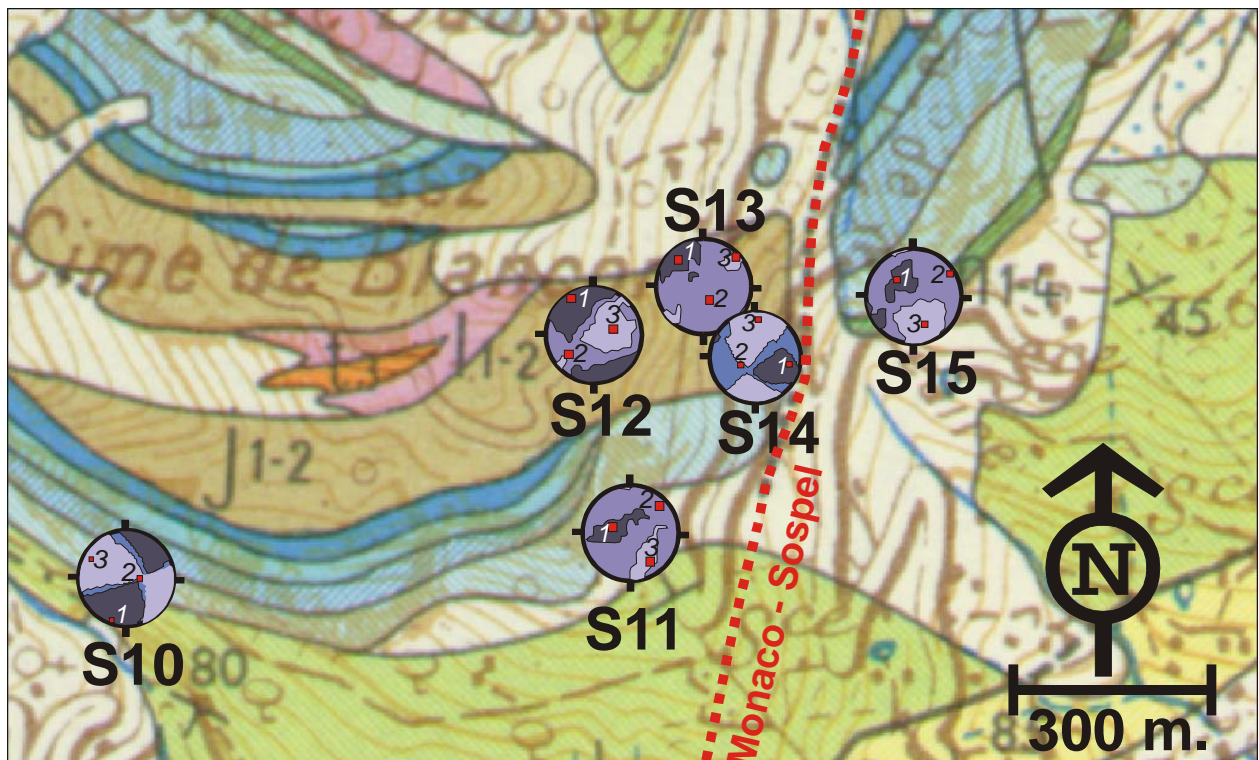


Figure 44. Paléochamps de déformation dans le Jurassique du secteur B (fond cartographique : feuille Menton – Nice 1/50.000^e, Gèze, 1968)

Sur la base du schéma et de la chronologie établis à partir des résultats du secteur A, nous assimilerons les raccourcissements NNE-SSO à ceux anté-miocène générateurs des plis régionaux post priabonien et anté-miocène axés NO-SE.

Nous considérerons les raccourcissements (λ_3) NO-SE comme postérieurs aux raccourcissements NNE-SSO.

c) Secteur C du Col des Banquettes

Dans ce secteur, la bordure Est de l'arc de Nice constitue une limite pour l'accident régional Rocca Seira-Ongrand de direction générale NO-SE dont on connaît le jeu précoce au cours même de la sédimentation Jurassique (Dardeau, 1983).

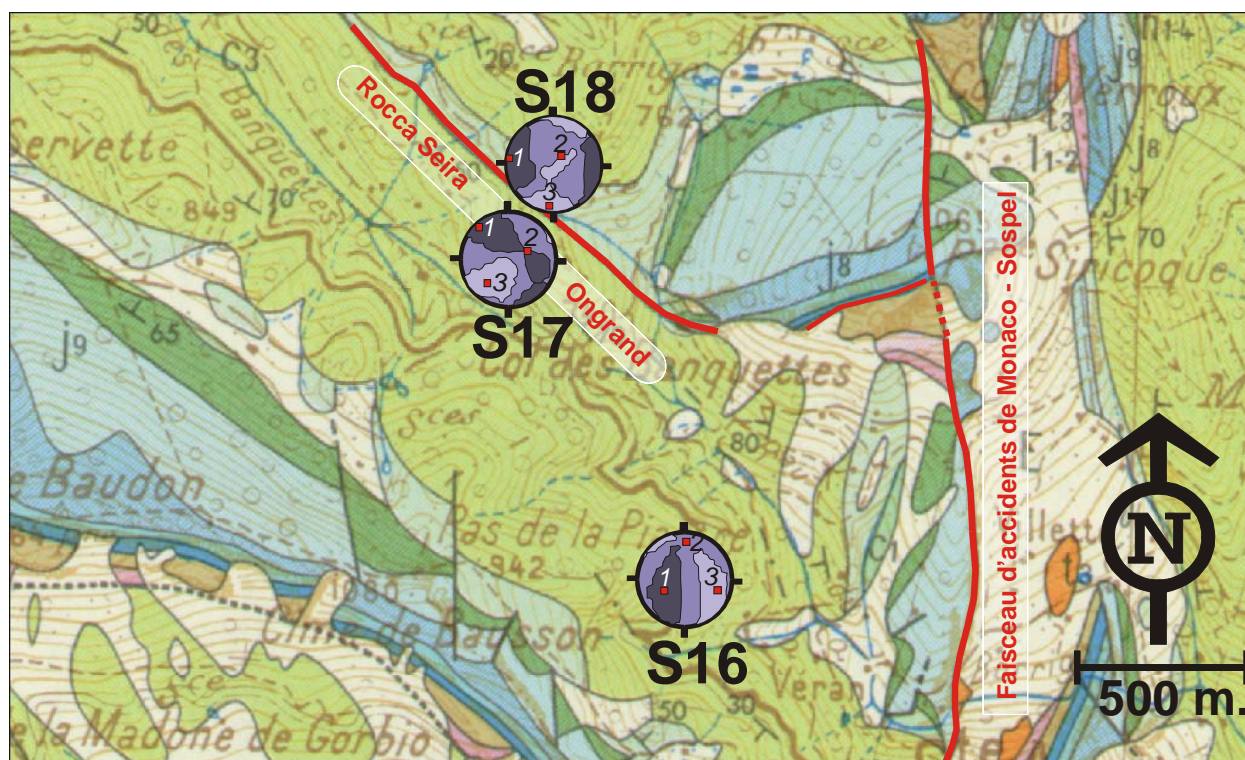


Figure 45 : Paléochamps de déformation dans le Crétacé du secteur C (fond cartographique : feuille Menton – Nice 1 :50.000°, Gèze, 1968)

Les champs de déformation fragile finis sont déduits de l'analyse des miroirs striés observés dans le Crétacé (S17, S18) de part et d'autre de l'accident « Rocca Seira-Ongrand ». Ils sont en accord avec son fonctionnement en décrochevauchement dextre (Figure 45). Les directions de raccourcissement (λ_3) sont en effet orientées NNE-SSO ; elles peuvent être assimilées aux raccourcissements générateurs des plis NO-SE anté-miocène.

Vers le Sud en se rapprochant de la bordure sub-méridienne orientale de l'arc de Nice, le raccourcissement est NE-SO ce qui induit un jeu dextre probablement précoce pour cette limite (S16).

d) Conclusion relative à l'accident de Monaco-Sospel entre Monaco et Col des Banquettes :

Le jeu fini de la bordure orientale de l'arc de Nice est clairement senestre (Ritz, 1992). Mais le fonctionnement de cet accident s'avère polyphasé. Sur la base de nos résultats et des données structurales régionales, nous confirmons le schéma déjà proposé pour la limite Est de l'arc de Nice (Guardia et Ivaldi, 1996) : au niveau du régime des contraintes les accidents constituant cette zone limite ont eu un jeu décrochant globalement dextre avant l'Aquitaniens, et senestre entre l'Aquitaniens et l'actuel. Ces derniers sont quantitativement plus importants.

Les champs de déformation successifs ont eu pour caractéristiques des directions de raccourcissement d'abord NNE-SSO à NE-SO puis NS à NO-SE. Avant l'Aquitaniens le régime de déformation responsable de la genèse de plis et de failles est à la fois ductile et fragile. Après l'Aquitaniens la déformation fragile est devenue prépondérante en relation probable avec une remontée de l'ensemble du bâti alpin de cette zone.

Les paléochamps de déformation définis ci-dessus appliqués à la faille « Larvotto-Mont Gros » induisent pour celles-ci les paléojeux suivants :

- des paléojeux à dominante dextre avant l'Aquitaniens compte-tenu des raccourcissements NE-SO en limite angulaire par rapport à l'orientation générale de l'accident.
- des paléojeux à dominante senestre après l'Aquitaniens en fonction des raccourcissements NS.

La faille du « Larvotto-Mont Gros » est à ranger dans la famille linéamentaire NE-SO à jeu décrochant senestre du réseau réghmatique régional.

1.4.1.2. Les accidents de Peille-Laghet et de Peille- Cap d'Ail

Deux accidents majeurs convergent dans la région de Peille depuis le bord de mer :

- l'accident "Peille - La Turbie - Cap d'Ail" qui découpe la croûte continentale régionale de Peille au lieu-dit Les lacs, du col de Guerre à la Tête de Chien et jusqu'à Cap d'Ail.
- l'accident qui partant de Peille passe par Laghet et rejoint la côte au niveau du fort de la Revère.

Les champs de déformation liés aux fonctionnements de ces accidents ont été précisés par l'étude de 5 secteurs (D,E,F,G,H) situés en bordure de mer ou à l'intérieur des terres.

a) Secteur D de Saint Laurent d'Eze - Monaco

Les deux sites de mesures sont situés aux extrémités méridionales des accidents "Peille - La Turbie - Cap d'Ail" et de « Peille – Laghet » (Figure 42 - Figure 46).

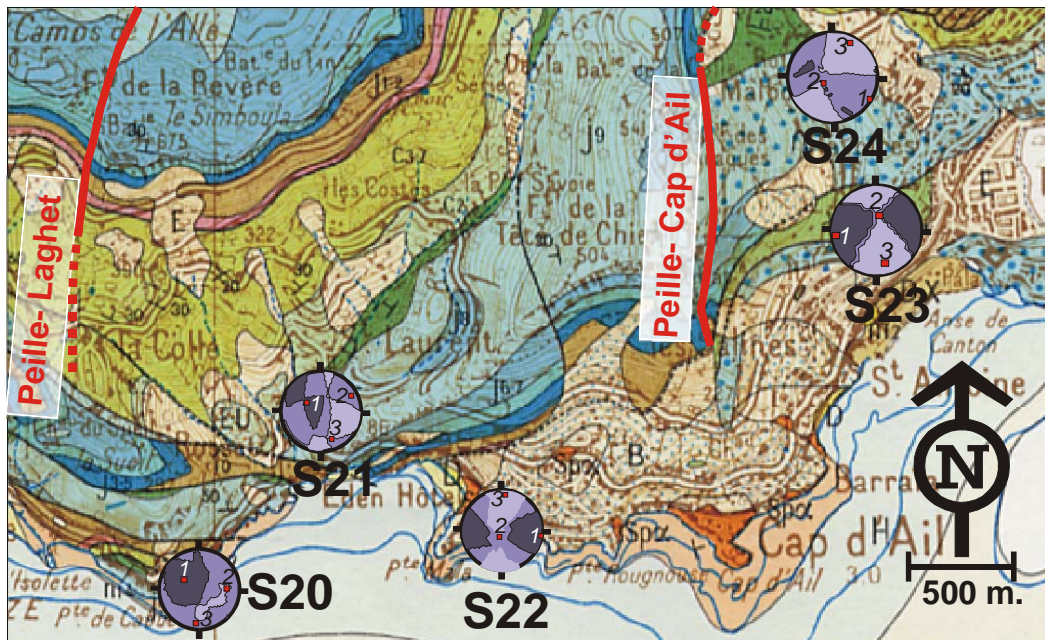


Figure 46 : Paléochamps de déformation dans le Jurassique du secteur D (fond cartographique : feuille Menton – Nice 1/50.000°, Gèze, 1968)

- accident "Peille - La Turbie - Cap d'Ail": le vecteur de raccourcissement (λ_3), déduit de l'analyse de deux sites, l'un Jurassique et l'autre Crétacé, fluctue autour de la direction NS. En conséquence pour de faibles variations de la direction de raccourcissement le paléojeu décrochant de l'accident NS "Peille-la Turbie - Cap d'Ail" s'inverse.
- accident "Peille - Laghet" : trois sites ont été étudiés à proximité de la terminaison méridionale de cet accident (S20, S21 et S22). Les sites S20 et S21 concernent des affleurements jurassiques. Le site S22 "des meules du Cap d'Ail" correspond à un affleurement côtier de brèches datées par des faunes du Quaternaire. Ces brèches exploitées dans le passé pour la confection de meules sont fortement fracturées, recoupées par des fentes de calcite datées de plus de 300.000 ans (Dubar *et al.* 1993).



Figure 47 : Faille sub-méridienne traversant une meule dans une ancienne carrière à Cap d'Ail.

Concernant ce secteur et la néotectonique notons que Dubar (2004) propose que l'association d'une faille et d'une meule en cours de dégagement (Figure 47) soit due à un séisme historique, contemporain ou postérieur à l'exploitation de cette carrière non datée, probablement le séisme Nissard de 1564. Nous pensons que ce séisme majeur pour la région (voir **Annexe 1**) n'a toutefois pas été assez fort pour fissurer un massif de roche résistante comme le sont ces brèches. Rappelons que d'après Laurenti (1998) les dommages du séisme Nissard de 1564 au niveau de Cap d'Ail étaient mineurs et qu'aucune victime n'était à déplorer en bord de mer. Nous pensons plutôt que la formation de cette faille, si elle est bien postérieure à la formation de la carrière, est plutôt due à des mouvements continus (affaissements ou décrochements) ayant fini par entraîner la fissuration de ce massif.

Le raccourcissement NE-SO déduit de l'analyse microstructurale correspond donc à un champ de déformation récent, Quaternaire. En conséquence, l'accident de "Peille - Laghet" a très probablement eu un jeu récent décrochant dextre compte tenu des champs de déformation développés dans son proche environnement.

Notons que l'accident de "Peille - Laghet" a un jeu fini clairement dextre au niveau du fort de la Révére.

Par ailleurs, des directions de raccourcissements NE-SO sont en bon accord avec le fonctionnement des chevauchements littoraux à vergence sud de Saint-Laurent d'Eze.

b) Secteur E de Laghet

Ce site correspond au lieu dit Spraes (Figure 48). Il se trouve à l'intersection des accidents de Peille-Laghet et de Paillon-Monaco, ce qui peut expliquer sa très grande fracturation. Des brèches à éléments carbonatés d'âge jurassique y sont intensément tectonisées. Les brèches sont attribuées au plio-quaternaire sans plus de précisions (communication orale de M. Dubar, 2002). Elles présentent une déformation fragile polyphasée marquée par la présence de miroirs de failles striés, de fentes de calcite fibreuse et de miroirs non striés décalant les fentes de calcite avec des rejets de l'ordre de 15 à 20 cm. Ces trois types d'objets tectoniques sont en relation avec les champs de déformation suivants :

- pour la population des miroirs de failles striés, un champ de déformation défini par un raccourcissement (λ_3) N310°E, penté à 05° et un allongement (λ_1) N219°E, penté à 10°.
- pour les fentes de calcite fibreuse orientées, N66 à N80°E pentées 67 à 76°SE, un champ de déformation défini par un allongement moyen (λ_1) N345°E, 07°.
- pour les fractures décalant les fentes de calcite, à jeu dextre sur des plans N105-110°E pentés 64-84°N, à jeu senestre sur des plans N22°E pentés 15°SE, un champ de déformation défini par un raccourcissement N342°E, penté à 27° et un allongement 218°E, penté à 45°.

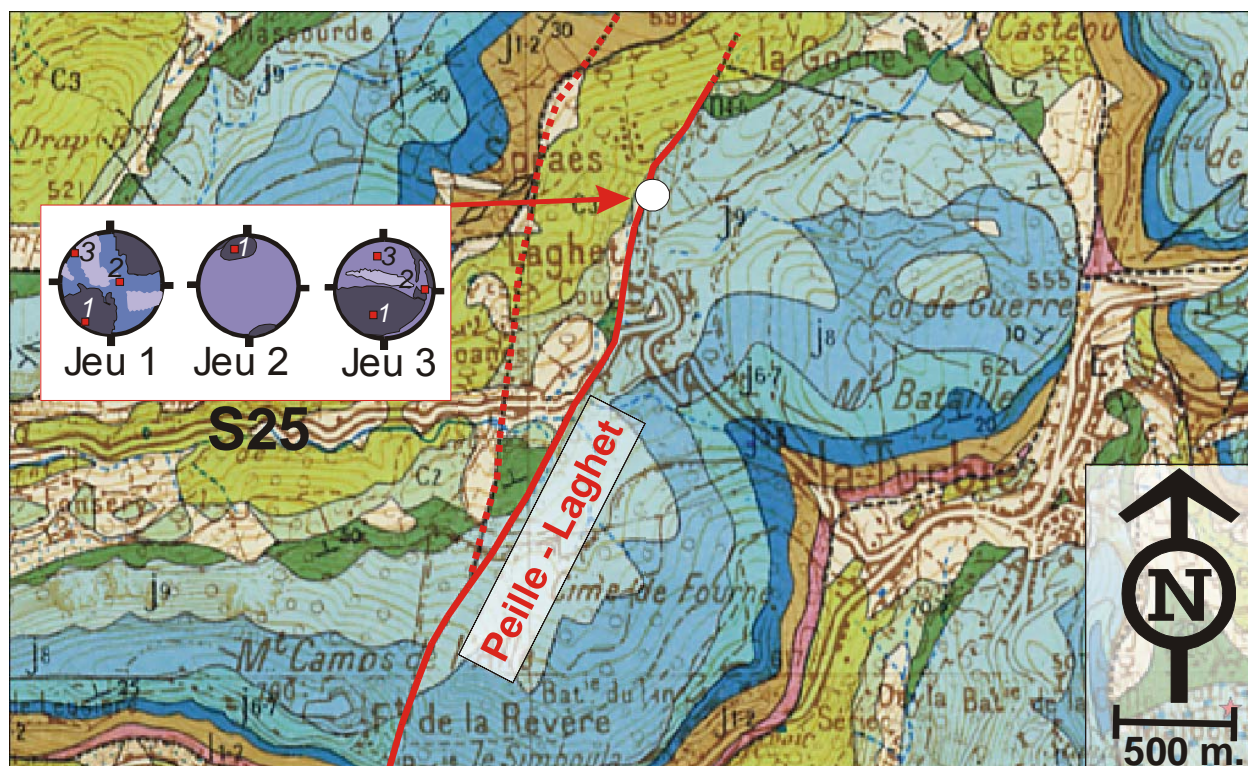


Figure 48 : Paléochamps de déformation dans les brèches "plio-quaternaire" à éléments jurassiques du secteur E (fond cartographique : feuille Menton – Nice 1/50.000^e, Gèze, 1968)

Deux interprétations peuvent être données à partir de ces résultats :

- une mobilisation successive de la direction moyenne NO-SE en raccourcissement entrecoupée d'une phase en allongement de même direction. Le jeu 1 et 3 est conforme à la perturbation locale du régime des contraintes observée par Ritz (1992) à l'extrémité nord-ouest de cette faille. Ce jeu est de type extensif avec un λ_1 orienté en moyenne OSO-ENE.
- une succession de deux jeux : un premier caractérisé par un allongement N345°E subhorizontal et un second par un raccourcissement N310 à N342°E penté de 5 à 30°. Cette interprétation est compatible avec le schéma tectonique et la chronologie définis en page 87 à propos des accidents de la bordure orientale de l'arc de Nice.

Quelle que soit l'interprétation retenue ces résultats montrent que le site a été fortement perturbé dans un passé récent plio-quaternaire. La faille de "Peille - Laghet" a joué diversement dans un passé récent et la présence de l'accident N100°E Paillon - Monaco mis en évidence par l'analyse géomatique contribue à rendre ce nœud tectonique actif.

c) Secteur F de Peille

Le site analysé (F) se situe à la jonction de l'accident NS "Peille - La Turbie - Cap d'Ail" et l'accident SSO-NNE dit de "Peille - Laghet" à environ 500 m au sud de Peille (Figure 49).

Le champ de déformation déduit des miroirs striés mesurés dans le Jurassique conduit à des raccourcissements (λ_3) N330°E, pentés à 15° et un allongement (λ_1) N237°E, penté à 12°. Le raccourcissement est similaire à celui donné par les brèches plio-quaternaires du site de Laghet (Spraès). Il est en relation avec le jeu senestre des deux accidents.

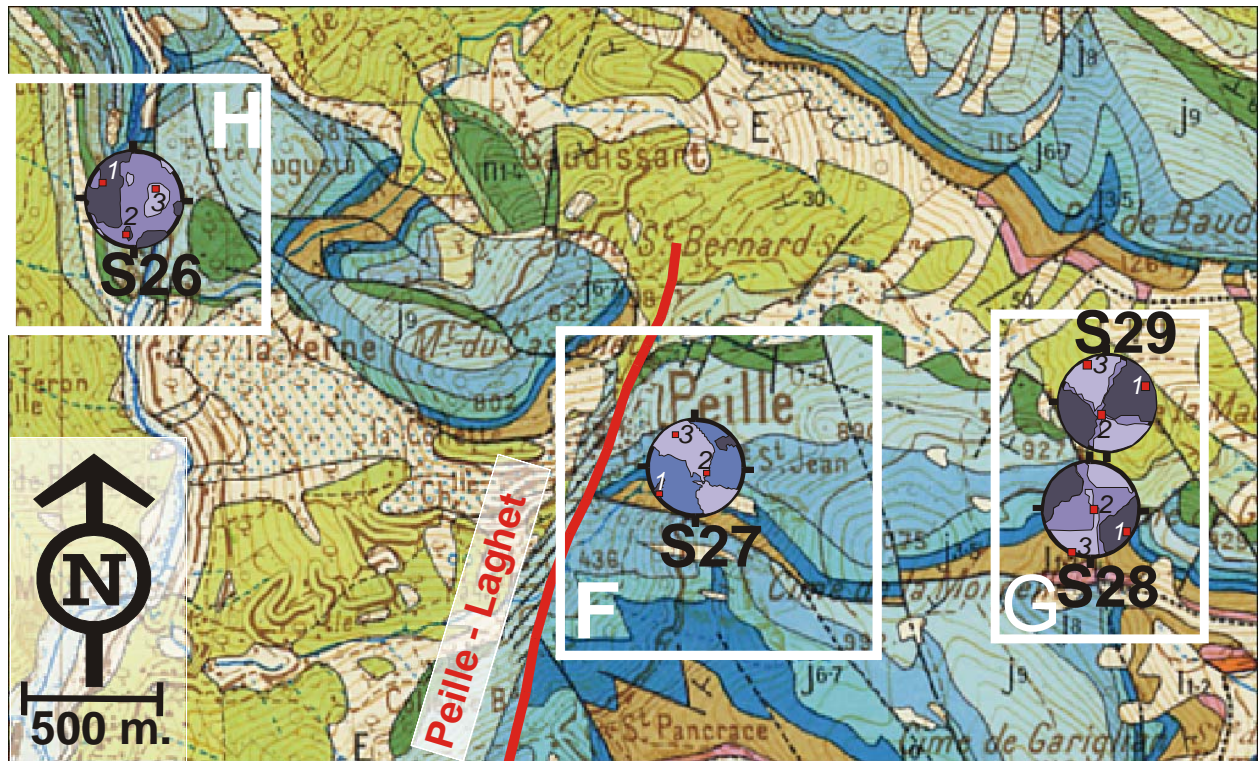


Figure 49 : Paléochamps de déformation dans le jurassique du secteur F, dans le Jurassique et Crétacé du secteur G et dans le Jurassique du secteur I (fond cartographique : feuille Menton – Nice 1/50.000°, Gèze, 1968).

d) Conclusion sur les accidents de "Peille - La Turbie - Cap d'Ail" et de "Peille -Laghet"

L'ensemble des sites analysés dans le proche environnement de ces deux accidents montre que l'axe de raccourcissement (λ_3) de la déformation fragile présente deux orientations différentes NE-SO et NO-SE. De tels raccourcissements inversent le jeu de ces deux accidents qui ont joué en décrochement à la fois dextre et senestre. Les mesures effectuées sur des formations récentes rapportées au plio-quaternaire montrent que ces inversions se sont notamment produites dans un passé récent que l'on peut évaluer au dernier million d'années écoulées.

1.4.1.3. Les accidents des bordures Est, Ouest et Nord de la zone de Peille

Trois sites, G,H,I (Figure 42), se rapportent à ces bordures, ils concernent des écailles orientées NO-SE à E-W constituées de Jurassique et de Crétacé, découpées par des failles subméridiennes.

a) Secteur G du col de la Madone

Au niveau du col de la Madone deux sites ont été analysés (Figure 49).

Le site sud est situé une vingtaine de mètres en contrebas du col. Les mesures ont été réalisées sur le miroir de faille d'un accident N150-N160°E mettant en contact le Jurassique carbonaté et les marno-calcaires du Crétacé supérieur. Le champ de déformation déduit de l'analyse des miroirs striés conduit à des raccourcissements SSO-NNE. Un tel raccourcissement induit un jeu décrochant dextre de l'accident conforme au jeu fini observé sur le terrain.

Le site Nord, situé dans les marno-calcaires du Crétacé supérieur affleurant à l'Est du col, présente un ensemble de miroirs striés induisant des raccourcissements λ_3 orientés N333°E pentés à 12°, très proche de la direction de l'accident décrochant du col de la Madone. En conséquence, le paléojeu de cet accident peut s'être inversé au cours du temps, pour de faibles variations de la direction de raccourcissement. Nous retrouvons là un schéma déjà mis en évidence au niveau des accidents de "Peille - Laghet".

b) Secteur H de Santa-Augusta.

Le site de Santa-Augusta correspond à une écaille de direction NO-SE armée par du Jurassique, comprise entre le chevauchement d'Ongrand situé plus au Nord et le synclinal de Contes de même orientation (Figure 49).

Les miroirs striés présentent un raccourcissement λ_3 N63° penté 50°. Il est assimilable à celui de la phase de déformation précoce anté-miocène définie précédemment. De telles directions de raccourcissement ont mobilisé l'écaille en décrochevauchement dextre. Elles peuvent être évoquées pour la mise en place du synclinal de Contes et la genèse du chevauchement d'Ongrand qui présente une vergence Sud à Sud Est, ceci sans préjuger de leur époque de formation.

Ce raccourcissement appliqué à la partie SSO-NNE de l'accident "Peille - Laghet" au niveau de Peille, implique pour celui-ci un jeu dont la composante décrochante est dextre. Un tel jeu ne correspond pas au jeu fini de cet accident. Ceci démontre une fois de plus que les accidents sub-méridiens convergents dans la zone de Peille ont présenté, au cours du temps, un jeu polyphasé similaire au jeu des accidents de la bordure Est de l'arc de Nice.

c) Secteur I de l'Erbossière

Ce secteur situé au Nord de Peille, dans le prolongement de l'accident "Peille - Laghet", regroupe cinq sites de mesure : trois sont localisés dans le Jurassique de l'écaille du Baudon et deux dans le Crétacé supérieur chevauché par l'écaille d'Ongrand (Figure 50).

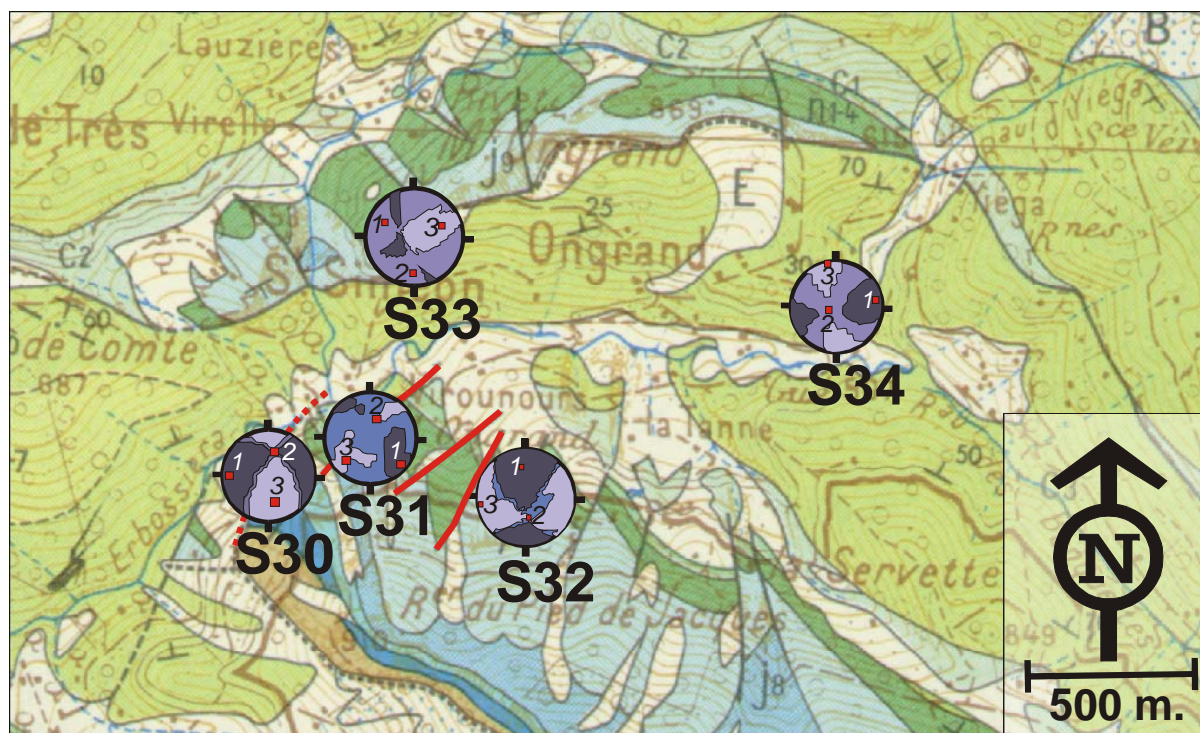


Figure 50. Paléochamps de déformation dans le Jurassique du secteur I (fond cartographique : feuille Menton – Nice 1/50.000^e, Gèze, 1968).

C'est dans le site le plus occidental numéroté S30 que se trouve le miroir de faille le plus important de toute la zone d'étude (Figure 27). Ce site est localisé à la base du rocher du Pied de Jacques sur l'impasse qui descend au hameau de Virounours à partir de la route reliant Peille au Col des Banquettes.

Ce miroir de faille de direction moyenne N25°E, pendage de 70° vers l'Ouest, présente des cannelures inclinées de 45° vers le sud et des stries horizontales. Cette faille serait une paléofaille normale reprise postérieurement en décrochement probablement après basculement (Charreau, 2002).

La partie NO tronquée de la base de l'écaille du Rocher du Pied de Jacques, est découpée par une série de failles orientées NE-SO à SSO-NNE dont le jeu fini est dans la grande majorité des cas senestre, conforme au décalage structural des écailles ainsi qu'au jeu fini des accidents du secteur de Peille - Laghet .

L'analyse de miroirs striés montre que seul le site, le plus proche des accidents qui tronquent vers le NO l'écaille du Baudon (S30), présente un raccourcissement NNO-SSE similaire en direction aux raccourcissements des sites de Peille et de Laghet.

Vers l'Est, λ_3 devient NE-SO ; ce raccourcissement est assimilable à ceux de la phase précoce anté-miocène de la bordure Est de l'Arc de Nice. Les raccourcissements NE-SO peuvent avoir fait fonctionner les failles de même direction en décrochement dextre ou senestre : ils ont induit un jeu senestre au niveau de l'accident principal de Peille - Laghet responsable du décalage plurihectométrique de Santa Augusta - Castellet et du Baudon (Figure 51).

d) Conclusion sur les accidents des bordures Est, Ouest et Nord de la zone de Peille



Figure 51 : Quantification du jeu fini horizontal du décrochement senestre de Peille – Laghet entre l'unité du Castellet - Santa Augusta et celle du Baudon (fond cartographique : feuille Menton – Nice 1/50.000°, Gèze, 1968).

Ces accidents situés dans le prolongement ou à proximité de la continuité de la faille de Peille -Laghet et Peille-La Turbie-Cap d'Ail. ont présenté au cours des 40 derniers millions d'années deux types de jeux opposés pour des raccourcissements peu différents en direction : des jeux à composante horizontale dextre pour les raccourcissements NE-SO et des jeux à composante horizontale senestre pour des raccourcissements NNO-SSE.

Le jeu fini des accidents étant dans la plupart des cas senestre, nous pouvons en conclure que les raccourcissements NNO-SSE ont été quantitativement les plus importants. Le décalage cartographique de 1,32 km entre les unités du Baudon et du Santa Augusta- le Castellet l'atteste (Figure 51).

1.4.1.4. Les grands alignements E-O de la région

a) Analyse microstructurale de l'accident col Saint Michel - Sospel

L'ensemble des sites analysés dans le proche environnement de la faille N100°E du "Col Saint Michel - Sospel" présente des champs de paléodéformation dont les directions de raccourcissement sont majoritairement orientées EO. Des raccourcissements NS sont relevés de façon plus ponctuelle.

Vers l'ouest, au niveau de l'écaille de la Rocca Seira le raccourcissement moyen est N260°E, penté 10°, ce qui est en bon accord avec le jeu senestre des failles N100°E qui découpent le front occidental de l'écaille (Figure 52).

De telles directions de raccourcissement induisent un jeu senestre sur les accidents EO, mais une faible variation de l'orientation de cet axe de raccourcissement pourrait en inverser le jeu.

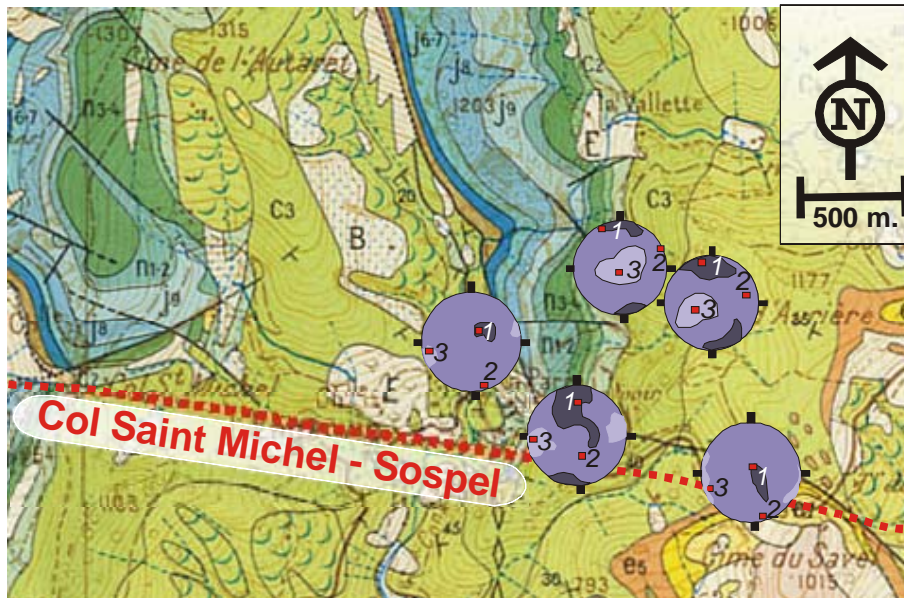


Figure 52 : Paléochamps de déformation relevés dans le crétacé supérieur chevauché par le Jurassique de l'écaille de la Rocca Seira au passage de l'alignement N100°E Col Saint Michel - Sospel (feuille Menton – Nice 1/50.000°, Gèze, 1968).

A l'extrémité Est de l'alignement N100°E, au niveau du col de Braus (Figure 53), le raccourcissement est N275°E, 10° dans le Sénonien, sur des miroirs décrochants dextres orientés N60°E et subverticaux. En s'éloignant de l'alignement en direction du Sud, λ_3 est orienté N353°E, 05° dans le Turonien, sur des miroirs décrochants senestres de directions variées.

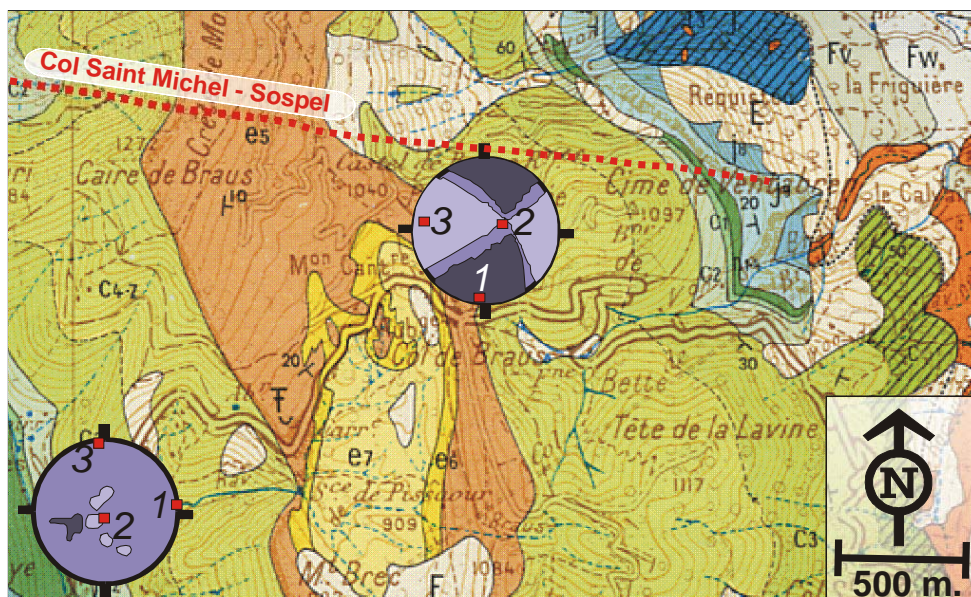


Figure 53 : Paléochamps de déformation dans le Sénonien et le Turonien du synclinal du Col de Braus au passage de l'accident N100°E col Saint Michel - Sospel. Fond de carte géologique (feuille Menton – Nice 1/50.000°, Gèze, 1968).

L'analyse des miroirs montre par contre des jeux tantôt dextres, tantôt senestres. De telles inversions s'expliquent aisément par de faibles variations d'orientation de λ_3 autour de la direction NS.

b) Analyse microstructurale de l'accident Paillon - Monaco

Les quelques mesures dont nous disposons le long de cet alignement correspondent à des raccourcissements globalement NS.

L'accident Paillon- Monaco, identifié par l'analyse géomatique, traverse le Paillon de Contes à La Condamine. Des mesures ont été effectuées lors du percement du tunnel de la Condamine pour la pénétrante du Paillon (Ivaldi, 2003). Sur le site de "La Condamine" les champs de déformation déduits des miroirs striés mesurés dans le Turonien conduisent à des raccourcissements N192°E, 17 et N 300°E, 34 ce qui impliquerait un paléofonctionnement chevauchant à décrochement dextre pour un accident de direction N 100°E.

Sur le site de "Spraès" déjà étudié par ailleurs, les jeux déduits des miroirs de failles striés, des fentes de calcite fibreuses et de fractures décalant ces mêmes fentes induisent pour un plan de faille préexistant N100°E un paléofonctionnement chevauchant à décrochant dextre (Figure 54).

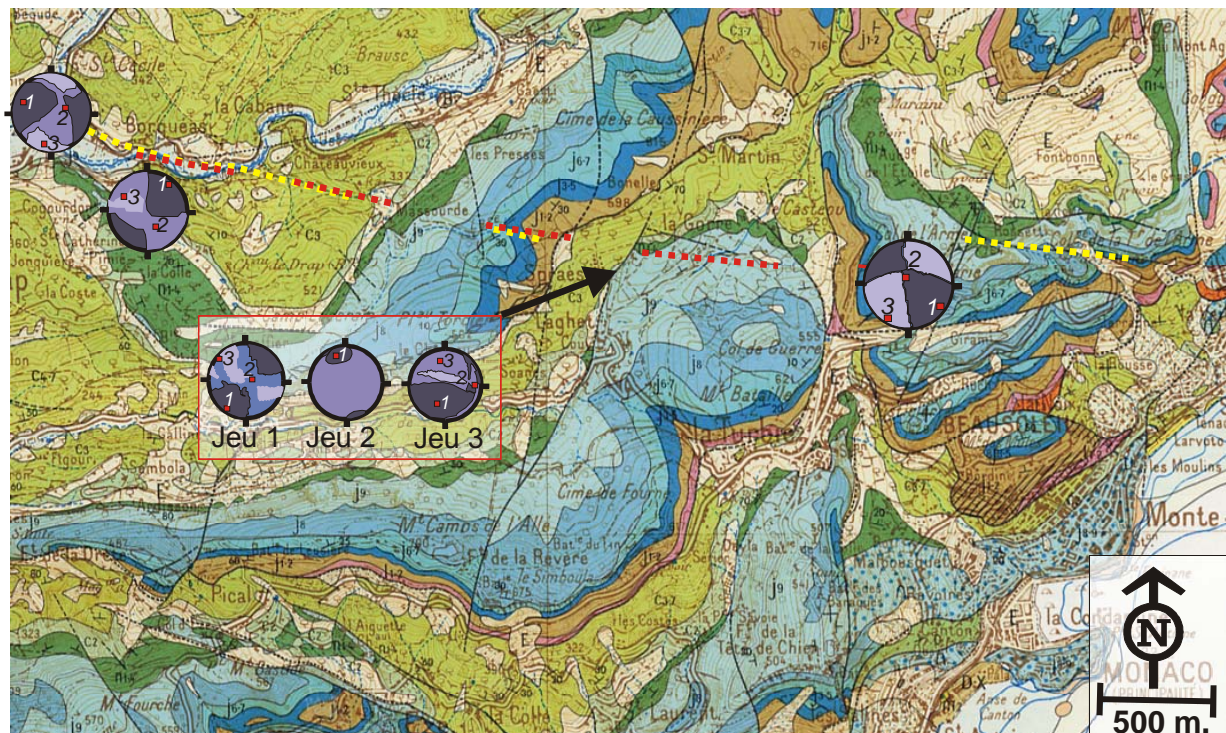


Figure 54 : Paléochamps de déformation relevés le long de l'alignement "Paillon-Monaco" (tracé jaune: MNT; tracé rouge: image SPOT) sur fond géologique (feuille Menton - Nice 1/50.000°, Gèze, 1968).

Vers l'Est, au niveau du Col de l'Arme, le raccourcissement λ_3 déduit de l'analyse des miroirs de failles striés relevés dans le crétacé inférieur est N215°E, 08°, ce qui implique un paléojou décrochevauchant senestre pour un accident N100°E (Figure 54).

1.4.2. Résultats à l'échelle locale : le bassin versant de Monaco

Le bassin versant de Monaco s'étend de la Pointe des Douaniers à l'Ouest à la Pointe de la Veille à l'Est. Il est limité par les lignes de crête joignant la Tête de Chien, le Mont-Agel et le Mont Gros.

Les bordures du bassin versant ont été étudiées précédemment avec les terminaisons terrestres méridionales des accidents NS Laghet-La Turbie-Cap d'Ail et Gorbio-Pointe de la Veille.

Les sites de mesure en surface s'étagent du versant du Mont-Agel jusqu'au pied du Rocher de Monaco. Les sites de mesures en souterrain (sud-ouest du vallon Ste Devote) ont été analysés lors du creusement du tunnel ferroviaire Cap d'Ail-Monaco (Perez, 1991).

1.4.2.1. Mesures de surface

Dans le bassin Versant de Monaco les directions de raccourcissements fluctuent dans une faible mesure autour d'une direction générale méridienne (Figure 55).

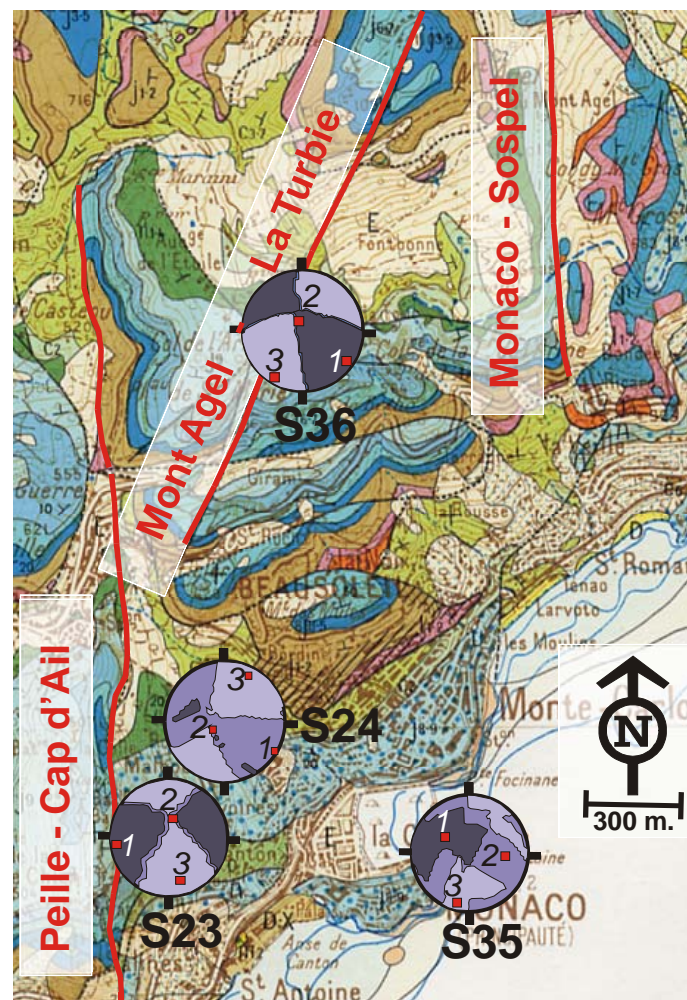


Figure 55 : Paléochamps de déformation relevés dans le bassin versant de Monaco (fond cartographique : feuille Menton – Nice 1/50.000°, Gèze, 1968).

Les directions de raccourcissement SSO-NNE sont similaires à celles observées dans le secteur de Roquebrune Cap-Martin et le long de la branche Est de la terminaison méridionale de l'accident "Peille - Cap d'Ail". Elles fonctionnent avec l'empilement d'écailles à vergence sud du versant méridional du Mont-Agel (écaille de l'Arme, de Giram, du Justicier et du Mont des Mules).

A l'approche de l'accident méridien de "Peille - Cap d'Ail" les directions de raccourcissement enregistrent une rotation antihoraire et deviennent NS à NNO-SSE.

La faille NNE-SSO du "Mont Agel – La Turbie", est un accident transverse qui joint en diagonale les deux accidents sub-méridiens encadrant la Principauté de Monaco à savoir la faille de "Peille - La Turbie - Cap d'Ail" et "Gorbio - Pointe de la Veille", une des terminaisons sud du linéament Saorge – Monaco.

Cet accident n'a pas de jeu fini net. Il a très probablement enregistré des jeux contraires lors des différentes phases de raccourcissements à l'origine des accidents bordiers de la Principauté de Monaco. C'est ce que laisse supposer la direction de raccourcissement N215,08 relevée le long de l'accident dans le Crétacé inférieur du Col de l'Arme (S36). Une telle direction fait jouer l'accident NNE-SSO en décrochement dextre

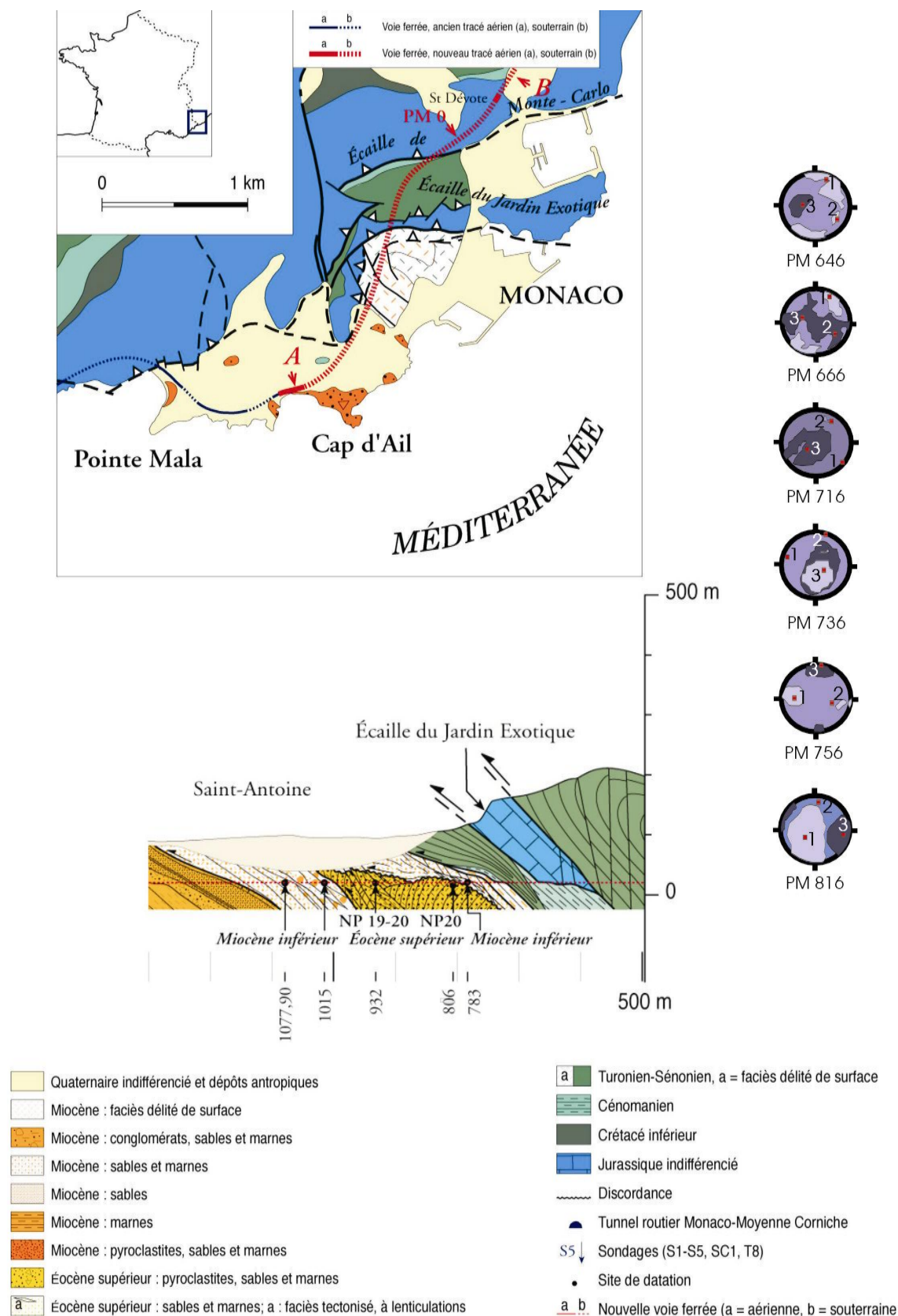
Le stéréogramme situé dans l'environnement immédiat de cet accident présente un axe de raccourcissement $\lambda 3$ N215,08 qui fait jouer cet accident orienté NNE-SSO en décrochement dextre, mais sa faible variation horaire peut en inverser le jeu. Rappelons qu'un tel mécanisme a également été observé pour le fonctionnement des deux accidents NS bordiers et que la faille du Larvotto étudiée dans le cadre de la conclusion relative à la bordure Est de l'arc de Nice a un jeu polyphasé à la fois décrochant senestre et inverse.

1.4.2.2. Mesures souterraines

Sept miroirs striés ont été relevés du Nord au Sud lors du creusement du tunnel de la voie ferrée et de la nouvelle gare de Monaco (Figure 56). Le point métrique 0 (PM 0) est situé côté NE du tunnel dans le vallon de Ste Devote ($x = 1008915$; $y = 172180$; $z = 22\text{m}$; en coordonnées Lambert III, zone Sud).

PM 646 et PM 666 : les miroirs striés affectent les marnes noires, parfois glauconieuses, du Cénomaniens soit dans leur masse principale, soit à leur contact immédiat avec l'écaille Jurassique du Jardin Exotique (PM 646). Ces miroirs ne fonctionnent pas avec le chevauchement E-W du Jardin Exotique mais peuvent fonctionner avec l'écaille subméridienne à vergence Est du Bautugan.

PM 716 : les miroirs striés fracturent des marno-calcaires situés au cœur du synclinal de Crétacé supérieur chevauché par l'écaille du Jardin Exotique. Ils peuvent fonctionner avec l'écaille du Jardin Exotique (et la formation du pli synclinal chevauché). Dans ce cas les miroirs seraient contemporains de la genèse des plis et des chevauchements développés avant l'Aquitaniens (hypothèse faite sur les zones de Roquebrune-Cap Martin et de Ste Agnès). Leur formation serait à mettre en relation avec la phase de déformation post-priabonienne et anté-aquitaniens au cours de laquelle le raccourcissement NE-SO a fait fonctionner les accidents méridiens en décrochement dextre.



PM 736 : les miroirs striés sont situés au contact des marnes noires du Cénomaniens et des marnes du Miocène. La direction de raccourcissement N132°E, 70° peut fonctionner avec l'échelle subméridienne à vergence Est du Bautugan, la branche nord des décrochements senestres courbes NNO-SSE à NO-SE qui affectent le Paléogène, le Néogène et le front du chevauchement du Bautugan. Une telle direction de raccourcissement induit également un jeu senestre pour les accidents NS.

PM 756 : Les miroirs striés sont localisés dans des lentilles de sables et de grès imbriquées dans des marnes sableuses datées du Miocène inférieur, elles mêmes chevauchées par le synclinal à cœur Crétacé supérieur et l'échelle du Jardin Exotique. Ils peuvent être contemporains de l'échillage vers le Sud de la couverture (Jardin Exotique). La direction de raccourcissement N07°E, 8° déduite de leur analyse fait partie de la famille des raccourcissements NNE-SSO qui font jouer les accidents NS en décrochements dextres (ex : l'accident "Peille - La Turbie - Cap d'Ail" qui affecte le Bautugan en décrochement dextre).

PM 816 et PM 836 : les miroirs striés affectent l'Eocène supérieur daté (NP20) composé par des alternances de bancs sableux localement grésifiés et de lits marneux avec des zones grésifiées. Les directions de raccourcissement sont ENE-OSO à EW. Elles peuvent fonctionner avec la branche NS à vergence Est de l'échelle du Bautugan.

Le suivi géotechnique dans la partie méridionale de la galerie de reconnaissance du tunnel Ferroviaire Cap d'Ail – Monaco (Vallon Ste Devote) a montré un agencement structural qui correspond à la déformation d'une série sédimentaire tendre avec des déformations violentes côté Nord (Perez, 1998). Ces déformations sont dues au chevauchement des unités jurassiques subalpines. Au sud les déformations épousent les butoirs résistants de l'avant pays que sont le massif volcano-sédimentaire de Cap d'Ail à l'ouest et le Crétacé chevauché à l'est sous l'hôpital. Une partie de l'échelle chevauchante du Jardin Exotique contourne l'obstacle selon un mouvement chevauchant aiguillé par certaines directions remobilisées en décrochement dextre.

1.4.2.3. Conclusion des observations et mesures réalisées à l'échelle locale

L'étude réalisée à l'échelle locale confirme les résultats obtenus à l'échelle régionale avec deux directions de raccourcissement principales :

- Une direction de raccourcissement NS à NE-SO, que l'on peut mettre en relation avec une phase de déformation post-priabonienne – anté-aquitaniennne. Cette phase de déformation affecte localement l'accident de "Peille - Cap d'Ail" en décrochement dextre dans sa terminaison méridionale, à savoir la branche NS du Bautugan (l'échelle du Bautugan se situant en bordure Est de cet accident).
- Une direction de raccourcissement NNO-SSE, correspondant à une phase postérieure à la précédente, fonctionnant notamment avec le chevauchement du Jardin Exotique au niveau de Monaco.

Ces deux directions de raccourcissement fonctionnent avec l'empilement d'échelles à vergence sud du versant méridional du Mont-Agel.

Au niveau des mesures souterraines, la direction de raccourcissement EW, est toutefois assez bien représentée. Elle peut fonctionner avec la branche NS à vergence Est de l'écaïlle du Bautugan. Cette direction de raccourcissement peut être considérée comme la troisième grande phase de raccourcissement d'âge probablement plio-quatenaire (Perez, 1975).

1.5. Conclusion sur les champs de déformation

Les miroirs striés de notre zone d'étude sont compatibles avec des paléodirections de raccourcissement globalement méridiennes à subméridiennes, en accord avec le raccourcissement NS que subit actuellement la région et qui se traduit notamment par la surrection continue du massif de l'Argentera - Mercantour.

Compte tenu de l'hétérogénéité du découpage fragile de la zone d'étude il est possible de distinguer deux grandes familles de directions de raccourcissement pour la période couvrant le Paléogène, le Néogène et l'Actuel :

a) Les directions de raccourcissement NS à ENE-OSO

Les directions de raccourcissement ENE-OSO sont prédominantes sur la bande littorale à Saint Laurent d'Eze, à Monaco et à Roquebrune – Cap-Martin. Les premiers effets antérieurs à l'Aquitaniens ont eu pour conséquences :

- la mise en place des plis axés NO-SE anté-aquitaniens de la région (ex : anticlinal du Cap Martin et par affinité les synclinaux de Contes et de Menton),
- la genèse des premiers chevauchements à vergence globalement Sud à Sud-Ouest (ex : chevauchement d'Ongrand),
- la mobilisation ou la remobilisation des accidents méridiens à subméridiens en décrochements dextres.

b) Les directions de raccourcissement NS à ONO-ESE

Plus tardives elles ont remobilisé les failles NS en décrochement senestre, en accord avec la frontière finie observable de la bordure Est de l'arc de Nice.

Les directions de raccourcissement NS à ONO-ESE sont bien représentées dans la partie nord de notre secteur d'étude où elles remobilisent les accidents méridiens en décrochements senestres : les deux failles de "Peille - Laghet" et "Monaco - Sospel" ont notamment un jeu fini décrochant senestre. Pour ces deux failles, le champ de déformation déduit de l'analyse des miroirs striés est globalement conforme à la déformation finie de ces accidents. Cependant, si le jeu fini est clairement senestre sur la majeure partie de ces accidents subméridiens, c'est en fait un jeu polyphasé dextre et senestre qui s'est succédé au cours du temps.

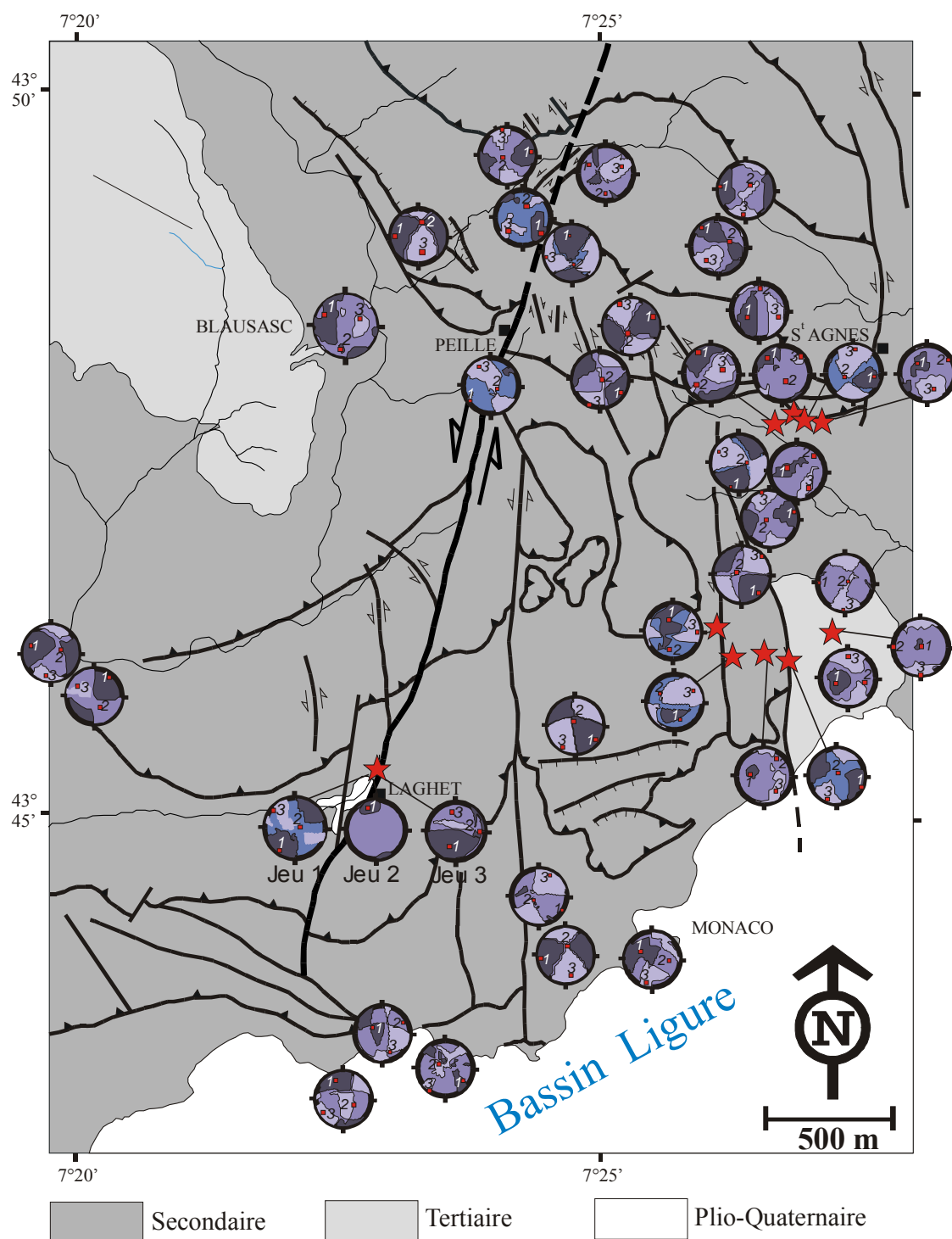


Figure 57 : Secteur d'étude avec localisation des sites d'analyse microstructurale et les champs de déformation calculés. Représentation des champs de déformation sous forme de stéréogrammes avec direction d'allongement (foncé, 100%) et de raccourcissement (clair, 0%) ; hémisphère inférieur, canevas équisurface avec 1, 2, 3 = axes d'allongement, intermédiaire et de raccourcissement .

2. Analyse de la sismotectonique

2.1. Les mécanismes au foyer

A terre, les mécanismes au foyer calculés dans la région (Madeddu *et al.*, 1996 et Baroux *et al.*, 2001) ont mis en évidence des jeux essentiellement décrochants dans l'arc de Nice et sur ses abords. Les solutions focales de ces séismes sont homogènes avec des axes P de direction NO-SE à N-S (Larroque *et al.*, 2001). Dans la région de Saorge-Taggia les mécanismes au foyer sont clairement décrochants dextres, accompagnés parfois d'une forte composante extensive (Madeddu *et al.*, 1996).

En mer, la marge septentrionale du bassin liguro-provençal est marquée par une déformation principalement compressive d'axe P NO-SE associée à l'inversion de paléofailles normales d'âge oligocène à miocène inférieur (Rehault et Bethoux, 1984 ; Ritz *et al.*, 1990). Cette déformation a été confirmée par le calcul de nombreux mécanismes au foyer. Au pied de la marge ligure, ce sont des mécanismes décrochants et inverses qui sont dominants. Les séismes récents tels celui du 19 juillet 1963 indiquent une direction moyenne E-O de l'axe P très différente de la direction moyenne NS des axes P sur la côte Ligure (Ritz, 1992).

Entre 5 et 15 km de profondeur sous le niveau de la mer (Madeddu *et al.*, 1996), toute la marge est sous l'influence d'un système compressif ou décrochant traduisant le début de la fermeture du bassin ligure (Bethoux *et al.*, 1992). Seul le séisme du 05/02/91 localisé en mer près de San-Remo présente un jeu extensif avec toutefois une forte composante décrochante.

2.1.1. Méthodologie et calcul de nouveaux mécanismes au foyer

La base de données des séismes fournie par le RENASS dans la région proche de Monaco (43,4°- 44° ; 7,1°- 8°) a permis d'identifier par l'intermédiaire d'un Système d'Information Géographique tous les séismes présentant un intérêt pour Monaco soit par leur proximité soit par leur magnitude. A partir de cette sélection nous avons isolé les séismes dont les mécanismes au foyer ont déjà été publiés (Tableau 6), ce qui a permis d'identifier dans la région proche de Monaco une dizaine de séismes qui n'ont jamais été étudiés et qui présentent un intérêt pour notre étude. Les données des réseaux italiens (Dipteris) et français (Renass et LDG) ont été récupérées pour ces séismes.

N°	Date aammjj	Heure hhmmss	Long. °E	Lat. °N	MI	Prof. km	Plan A			Plan B			Axes P		Axes T	
							Az.	Dip	Rake	Az.	Dip	Rake	Az.	Dip	Az.	Dip
1	820902	21:45:25.0	7.2630	43.9280	3.3	10	235	60	-109	020	35	-060	185	69	311	13
2	831204	17:34:51.0	7.7590	43.8600	3.5	4	190	54	-148	300	65	-041	160	46	063	07
3	851004	13:17:21.5	7.9800	43.5700	4.0	10	132	66	017	035	75	155	085	06	352	28
4	851004	15:22:11.0	7.9160	43.6100	3.9	14	210	45	108	005	48	073	107	01	204	77
5	851005	15:58:40.0	7.9160	43.5930	3.1	11	040	77	159	135	69	014	088	05	356	24
6	861020	20:29:11.0	7.7090	43.9300	3.0	2	203	79	-170	295	80	-11	159	15	069	01
7	891226	19:59:59.0	7.5610	43.4830	4.5	4	015	60	070	231	36	121	119	13	244	68
8	900415	07:50:36.0	7.7740	43.5740	4.3	5	025	70	042	278	51	154	148	12	259	43
9	900702	18:42:00.0	7.7250	43.9320	2.7	4	190	63	-137	303	53	-035	152	49	249	06
10	900809	19:16:57.6	7.4200	44.0030	3.2	6	116	60	-168	212	80	-031	078	29	341	13
11	900908	08:31:22.9	7.3800	43.8400	2.7	11	060	40	132	190	62	061	301	12	053	61
12	901002	02:06:24.1	7.7100	43.9400	2.9	11	300	80	-27	205	64	-169	165	26	070	11
13	910205	09:06:10.3	7.7600	43.7900	3.0	8	339	75	-136	083	48	-020	296	40	037	17
14	910628	23:48:48.0	7.4900	43.6700	2.9	5	092	62	108	237	33	060	169	15	038	68
15	950421	08:02:57.5	7.5563	43.8155	4.3	4	030	80	039	292	51	167	155	19	259	35
16	960926	21:37:36.7	7.6307	43.9562	2.7	7	187	40	-116	335	55	-070	194	72	079	08
17	961017	15:21:38.8	7.5287	43.9953	3.2	10	160	40	-090	340	50	-090	250	85	070	05
18	991101	17:22:00.0	7.3620	43.8050	3.4	3	209	75	-4	120	86	15	254	8	345	13
19	001219	14:20:00.0	7.3690	43.7950	3.4	3	216	85	22	304	68	175	168	12	262	19
20	001220	05:45:14.3	7.3630	43.7920	2.2	3	30	72	-30	130	78	18	262	4	354	22

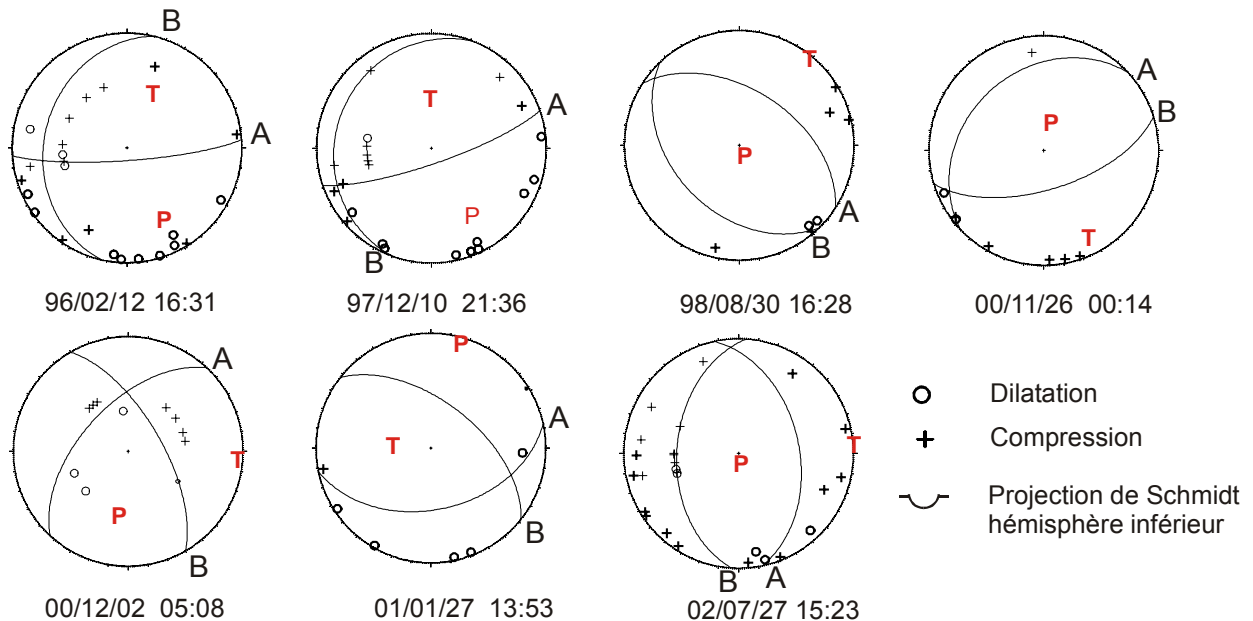
N°	Date aammjj	Heure hhmmss	Long. °E	Lat. °N	MI	Prof. km	Plan A			Plan B			Axes P		Axes T	
							Az.	Dip	Rake	Az.	Dip	Rake	Az.	Dip	Az.	Dip
21	001221	06:35:39.0	7.3620	43.7930	3.0	2	39	73	-24	136	68	18	88	3	357	28
22	010225	18:35:00.0	7.48	43.50	4.5	7	243	41	75	264	51	104	229	78	344	5

Tableau 6 : localisation et paramètres des mécanismes au foyer de la littérature pour la zone d'étude autour de Monaco entre la longitude 7,1° et 8° et la latitude 43°5 et 44° (Bethoux *et al.*,1988 ; Nicolas *et al.*, 1990 ; Bethoux *et al.*,1992 ; Madeddu *et al.*,1996 ; Courboux *et al.*, 1998)

Nous avons relocalisé ces événements avec la synthèse des temps d'arrivée avec le logiciel Hypo 77 et un modèle crustal adapté à la région suivant le modèle de vitesse déterminé par Gelis (2002) et utilisé par Courboux (2003). Ceci nous a permis de calculer outre les paramètres de localisation, les azimuts et angle d'incidence de chaque rai sismique, afin de calculer les mécanismes au foyer. Nous avons utilisé le logiciel FPFIT (Reasenberget Oppenheimer, 1985) qui fournit les plans nodaux statistiques les plus compatibles avec la distribution des polarités.

Les mécanismes au foyer des séismes qui ont été enregistrés par un nombre suffisant de stations (supérieur à 20) avec au moins 15 traces exploitables ont été calculés. Sept nouveaux mécanismes au foyer proches de Monaco ont pu être ainsi calculés.

Ces nouveaux mécanismes (Figure 58) sont analysés par rapport au contexte sismotectonique régional déjà mis en évidence dans la région (Bethoux *et al.*, 1992 ; Madeddu, 1996 ; Baroux *et al.*, 2001) et une synthèse avec l'ensemble de ces données est ensuite présentée (Figure 59).



	Date aammjj	Heure hh:mm	Long °E	Lat °N	MI	Prof.	Plan A			Plan B			Axe P		Axe T		Nb Sta.
							Az.	Dip.	Rake	Az.	Dip.	Rake	Az.	Dip.	Az.	Dip.	
21	960212	16:31	7,39	43,79	3.2	4,5	86	81	77	193	28	19	154	31	24	47	26
22	971210	21:36	7,55	43,80	3.3	5,7	71	79	103	201	17	41	150	33	357	54	31
23	980830	16:28	7,75	43,94	2.5	11,7	136	41	-80	303	50	-99	163	82	39	4	22
24	001126	00:14	7,45	43,77	2.5	5,9	73	62	-77	227	31	-113	11	70	154	16	15
25	001202	05:08	7,57	44,04	3.1	0,5	330	66	-143	223	57	-29	186	43	95	6	14
26	010127	13:53	7,52	43,86	2.6	4,2	78	45	50	308	57	123	15	7	272	62	22
27	020727	15:23	7,46	43,84	2.9	5,8	348	46	-101	184	45	-79	179	82	86	0	29

Figure 58 : mécanismes au foyers calculés dans cette étude et tableau de leurs caractéristiques.

2.1.2. Synthèse sismotectonique régionale

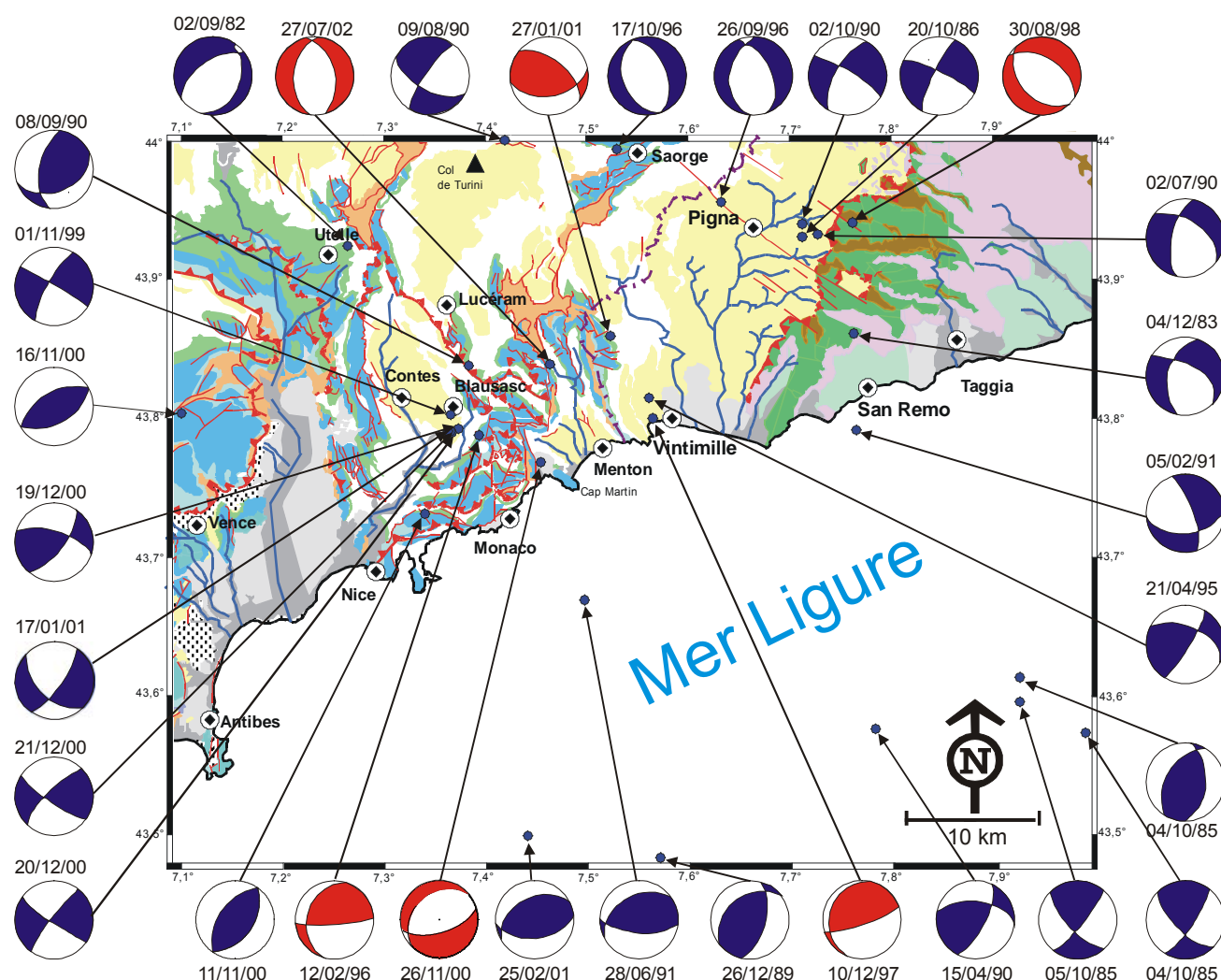


Figure 59: Carte des mécanismes au foyer de la littérature (Tableau 6) avec en rouge ceux calculés dans cette étude sur fond de carte géologique au 1/250.000°.

a) Domaine terrestre

Le séisme du 12/02/96 localisé près de Peille présentant un plan nodal d'orientation N13° peut être associé, malgré un faible pendage vers le NO, à l'accident de Peille - Laghet ou à sa branche sub-méridienne Peille-Cap d'Ail.

Les séismes de Peille du 01/11/99 et ceux de la crise sismique de Blausasc des 19/12/00, 20/12/00 et 17/01/01 présentent un plan nodal d'orientation N20° à N40°. Ils sont situés plus à l'Ouest que celui du 12/02/96 mais ont été reliés à cette faille (voir p.42). Les mécanismes au foyer des 4 séismes principaux de la crise sismique de Blausasc et les mécanismes au foyer composites réalisés pour les autres événements montrent tous une grande similarité (Courboux *et al.*, 2005)

Le mécanisme du 12/02/96 a un plan nodal similaire à celui du 08/09/90 situé plus au nord. Ce dernier localisé à environ à 10 km à l'ouest de l'accident Monaco – Sospel - Breil était d'après Madeddu (1996) compatible avec la géométrie du segment méridional de cet accident, ainsi qu'avec celui de Peille-Laghet.

Le séisme du 21 avril 1995 est associé à la réactivation d'un ancien décrochement en jeu dextre. La solution focale du choc principal et des trois répliques principales met en évidence une faille inverse dominante avec une composante décrochante importante. Des deux plans nodaux à N30°E et N112°E, c'est ce dernier qui a été retenu par Courboux (1998), les répliques s'alignant suivant une direction NO-SE.

Le séisme du **10/12/97** est situé à moins de 5 km au sud de celui du 21/04/95. Son mécanisme calculé dans cette étude avec un bon indice de confiance présente deux plans nodaux N71°E et N201°E. Il fait également ressortir un jeu essentiellement inverse avec une faible composante décrochante et serait contrairement au précédent plutôt assimilable au système de failles chevauchantes du bassin ligure.

Le séisme du **30/08/98**, ainsi que ceux du 26/09/96 et du 17/10/96, localisés eux aussi près de Saorge, présentent tous un jeu essentiellement normal. Le mécanisme du 30/08/98, le plus éloigné à l'Est de Saorge, présente un plan nodal N136°E compatible avec la famille d'accidents N140°E de Saorge-Taggia à dominante pourtant décrochante.

Les séismes du 26/09/96 et du 17/10/96 localisés plus près de Saorge ont des plans nodaux sub-méridiens. Ils sont situés à la croisée de deux familles linéamentaires, celle orientée N40°E de Roya-Bévéra-Paillon qui comprend l'accident de Breil-Saorge et celle orientée N140°E de Saorge-Taggia. Dans cette zone de recoupement d'accidents, Cosani (1996) avait proposé une série de failles N70-100°E à pendage vers le sud qui assuraient la connection entre ces deux accidents majeurs (Figure 18). Ces failles ont été identifiées sur le terrain lors de l'étude du nouveau tunnel du col de Tende (Com. orale J.L. Perez, 2004). Des failles normales subméridiennes profondes peuvent être à l'origine de séismes présentant un jeu normal afin de rééquilibrer la contrainte NS engendrée par le jeu senestre de l'accident de Monaco-Sospel-Breil-Saorge et du jeu dextre de l'accident Saorge-Taggia (Madeddu, 1996).

Dans le même secteur les séismes du 04/12/83, 20/10/86, 02/07/90 et du 02/10/90, tous localisés près de Saorge, ont un plan nodal d'orientation N120°E avec une composante décrochante dextre. Ils peuvent tous être associés à la famille d'accidents N120-140°E de Saorge - Taggia.

Le séisme du **26/11/00** localisé près du Cap Martin, à dominante essentiellement extensive, malgré sa proximité géographique ne peut être associé à la branche Sospel – Monaco qui est un décrochement d'orientation sub-méridienne à jeu senestre. Son mécanisme présente deux plans nodaux à N47°E et l'autre à N73°E. Ce mécanisme au foyer, assez similaire à celui du 02/09/82, pourrait être attribué à la famille d'accidents N40°E, comprenant entre autres celui de Breil-Saorge visible plus au nord.

Le mécanisme au foyer du séisme du **27/07/02** présente un mécanisme extensif avec un plan nodal d'orientation sub-méridienne similaire à ceux des 17/10/96 et 26/09/96 situés plus au nord-est dans les environs de Saorge. Ces mécanismes extensifs appartiennent à la zone de connection entre les familles de linéaments N40°E et N140°E.

Le séisme du **27/01/01** est situé à la périphérie sud de Sospel et présente deux plans nodaux de directions respectives N78°E et N128°E. Il n'est pas compatible avec l'accident Sospel-Monaco et son jeu inverse est plutôt caractéristique de celui de la marge nord Ligure. Il pourrait par contre appartenir à la périphérie ouest de la famille d'accidents Saorge-Taggia.

De même le séisme du **02/12/00** (Figure 58) localisé au nord de Saorge (relocalisé en bordure extérieure de notre secteur d'étude) présente un plan nodal à N40° compatible avec la continuité de l'accident Breil - Saorge vers le nord. Il fait partie de la même famille que les mécanismes du 20/10/86 et du 02/10/90.

Le mécanisme du séisme du 08/09/80 localisé dans les environs de l'Escarène présente un plan nodal de direction N10°E et de pendage 60° Ouest compatible avec la géométrie de l'accident Peille-Laghet situé plus au sud (Madeddu, 1996).

En conclusion, 2/3 des séismes ont une dominante extensive et les 1/3 restants ont une dominante décrochante. La plupart des mécanismes extensifs sont regroupés à l'Est de la bordure orientale de l'arc de Nice (Figure 52).

b) Domaine marin

Les séismes du 04/10/85 (15h : 22), 26/12/89, 15/04/90, 28/06/91, 25/02/01, tous situés en mer, ont des mécanismes au foyer mettant en évidence des jeux inverses sur des directions N60°E-N80°E. Ils peuvent être associés au système de failles décrochantes du Bassin Ligure. Les deux séismes des 04/10/85 (13h : 17) et 05/10/85 ont des mécanismes au foyer en relation avec des jeux décrochants.

Sur le talus continental au large de Monaco, l'événement du 28/06/91 présente un mécanisme dont le plan nodal E-O à pendage sud et à jeu inverse, est compatible avec les directions structurales de la marge Nord du bassin ligure (Réhault, 1981).

Pour le séisme du 05/02/91, situé sur la marge du bassin ligure près de San Remo, Madeddu (1996) retient le plan nodal N160 sub-vertical à jeu extensif comme plan de faille. Plusieurs accidents de direction N160 à N-S ont en effet été reconnus dans cette zone, aussi bien à terre (Giammariono *et al.*, 1980) qu'en mer, où ils correspondent à la direction des canyons (Chaumillon *et al.*, 1994).

2.2. Les états de contrainte

Comme observé précédemment (Figure 59), les mécanismes calculés pour notre zone d'étude montrent une grande variété de solutions. Sont-ils tous représentatifs du même champ de contrainte ?

2.2.1. Généralité sur le calcul de l'état de contrainte

L'état de contrainte actuel peut être calculé en utilisant la méthode développée par Carey-Gailhardis et Mercier (1987, 1992) détaillée en **annexe 4**. Cette méthodologie exploite les inversions de mécanismes au foyer. Cette méthode d'inversion suppose que le vecteur glissement (qui correspond aux stries pour les données géologiques et au plongement pour les mécanismes au foyer) se produise dans la direction de la contrainte de cisaillement déterminée par chaque plan de faille, le plan de faille étant une fracture préexistante.

L'exploitation des inversions de mécanismes conduit à calculer une moyenne du tenseur de contrainte déviatorique (se dit de la contrainte qui demeure quand la contrainte moyenne normale est soustraite de la contrainte totale) au mieux ajustée à partir d'un groupe de vecteurs glissements d'accidents pour minimiser la déviation angulaire entre le vecteur glissement supposé et le vecteur glissement déduit des mécanismes au foyer.

Les résultats des inversions fournissent l'orientation (azimut et plongement) des principaux axes de contraintes issus de la moyenne déviatorique du tenseur de contrainte aussi bien que le « stress ratio » : $R = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\sigma_3 - \sigma_1)$, une quantité linéaire décrivant l'importance relative de cet état où les principaux axes de contraintes σ_1 , σ_2 , σ_3 correspondent aux états compressifs, intermédiaires et extensifs de la contrainte déviatorique.

Pour calculer les états de contrainte à partir de la détermination des mécanismes au foyer il est nécessaire de connaître le vecteur glissement et donc en conséquence de sélectionner le plan de faille préféré pour chaque paire de plans nodaux.

2.2.2. Méthodologie employée et données exploitées

Pour calculer l'état de contrainte nous avons réalisé de nombreuses inversions de mécanisme au foyer en utilisant la méthode précisée ci-dessus. Cette méthode est appliquée en général pour des zones géographiques beaucoup plus étendues : sud-est de la France (Baroux *et al.*, 2001) et centre-ouest de la France (Mazabraud *et al.*, 2004). L'objectif ici est de distinguer des zones présentant des états de contrainte différents dans la région proche Monaco c'est-à-dire entre la longitude 7,1° et 8° et la latitude 43°5 et 44°.

Le catalogue exploité comprend beaucoup de séismes inférieurs à la magnitude 4. Cependant les événements sismiques de faible magnitude répondent en général au même état de contrainte que les champs de contrainte régionaux définis par rapport à des séismes de magnitudes plus importantes. Nous pourrions donc avoir statistiquement une bonne image de l'état de contrainte de la région à partir de ces événements (Amelung et King, 1997 ; Angelier *et al.*, 2004).

2.2.3. Les états de contrainte du Sud-Est de la France.

L'état de contrainte à partir de toutes les données sismotectoniques connues dans le sud-est de la France a été étudié par Baroux *et al.* (2001).

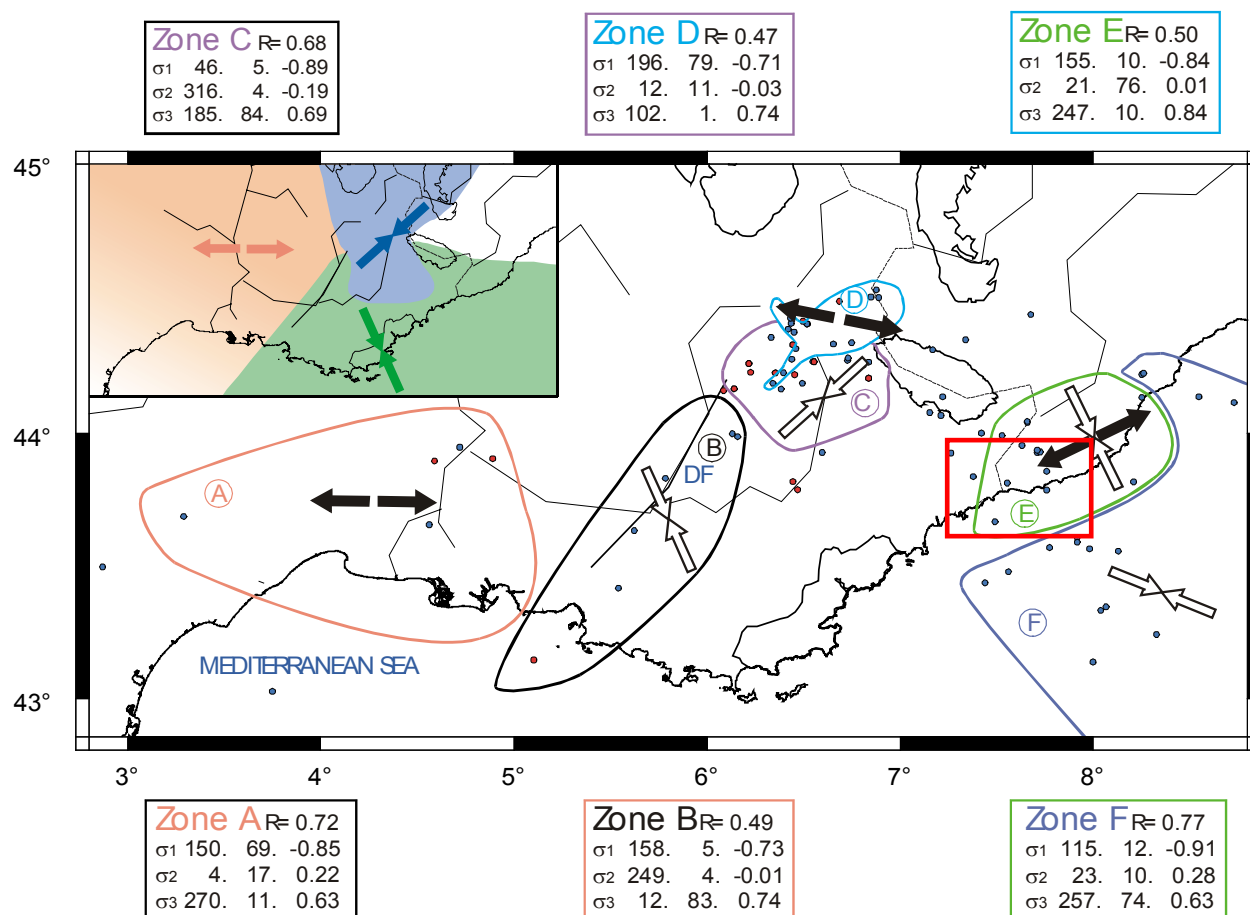


Figure 60 : Distribution des orientations de contraintes dans différentes zones de Provence (Baroux *et al.*, 2001). Les flèches blanches et noires correspondent respectivement aux axes de direction de σ_1 et σ_3 . Le cadre rouge correspond à la zone d'étude définie autour de Monaco.

La quasi totalité de notre secteur d'étude est englobée dans la zone dite des « continentaux » de la marge ligurienne qui présente d'après Baroux *et al.* (2001), un état de contrainte décrochant avec un σ_1 à N155°E. Seule l'extrémité sud de notre secteur fait partie de la zone « marine » de la marge ligurienne qui présente d'après ces mêmes auteurs un régime de contrainte inverse avec un σ_1 à N115°E.

2.2.4. Calcul d'un nouvel état de contrainte pour la région proche de Monaco

Pour ce secteur de la région proche Monaco compris entre les latitudes 43,5° et 44° et les longitudes 7°-8° nous avons analysé 30 événements dont 8 nouveaux séismes.

Pour que les inversions calculées soient les plus représentatives du véritable état de contrainte dans le secteur de la région de Monaco, nous proposons, en fonction de la répartition des mécanismes au foyer, de distinguer d'une part, les mécanismes au foyer à dominante inverse répartis dans le domaine marin, et d'autre part, ceux à dominante normale plus répandus dans le domaine terrestre. Deux zones sont distinguées :

- la zone Ter (parce que la majeure partie de cette zone est située à terre), avec 10 mécanismes utilisés.

- la zone Tal (parce que la majeure partie de cette zone est située sur le talus continental), avec 8 mécanismes utilisés.

Plus de 70% des mécanismes au foyer disponibles ont pu être exploités pour le calcul des états de contrainte dans le secteur de Monaco (Figure 61).

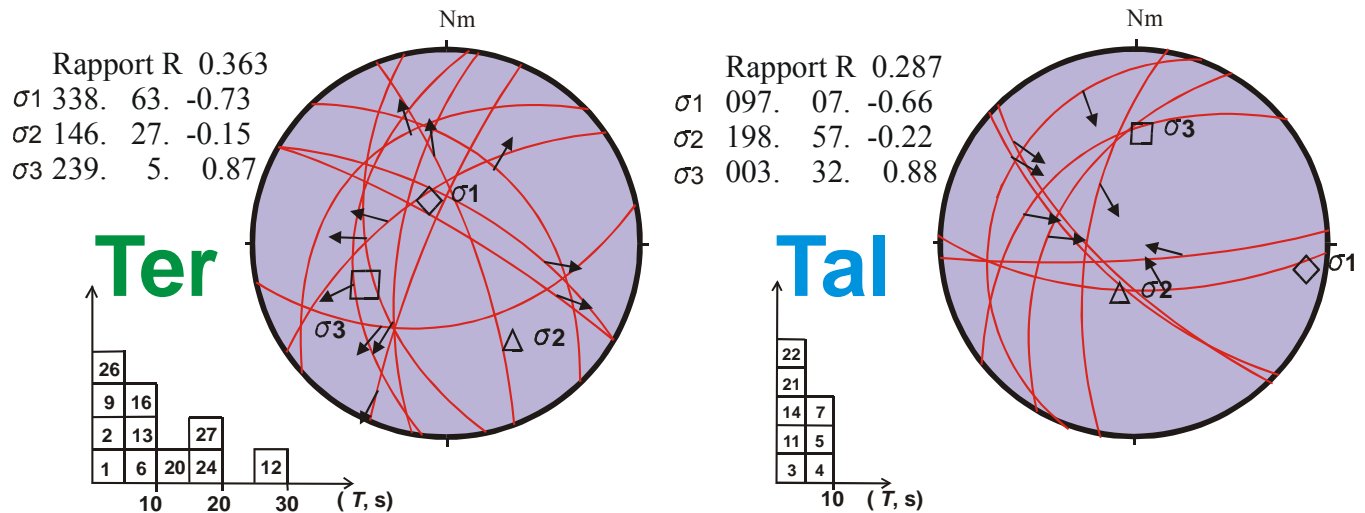


Figure 61 : diagrammes des inversions des mécanismes au foyer pour les zones ter et tal du secteur d'étude

- Dans le domaine terrestre, les résultats des mécanismes au foyer fournissent un état de contrainte clairement en extension (σ_3 : 239, 5) alors que la paléodéformation fragile présente un champ de déformation compressif NS avec une forte composante décrochante (Figure 64). Notons que l'état de contrainte actuel est en accord aux résultats obtenus par géodésie pour la partie centrale des Alpes occidentales (Noquet *et al.*, 2003; Calais *et al.*, 2001) qui atteste d'un changement récent de la géodynamique alpine.
- Dans le domaine marin, l'état de contrainte compressif σ_1 est très similaire (direction N97°E, et plongement de 7°), mais légèrement plus orienté E-O que celui déterminé par Baroux *et al.* (2001) pour une zone plus étendue incluant le bassin ligure (direction N 115°E et plongement de 12°).

En conclusion, le domaine terrestre présente un état de contrainte normal avec une faible composante décrochante et le domaine marin un état de contrainte inverse avec une forte composante décrochante pouvant être associée au système de failles décrochantes du bassin ligure. Cette distinction permet de tracer une limite de zone dans la région proche de Monaco. Cette limite sépare la zone essentiellement terrestre « ter » de la zone essentiellement marine « tal » (Figure 62 et Figure 63).

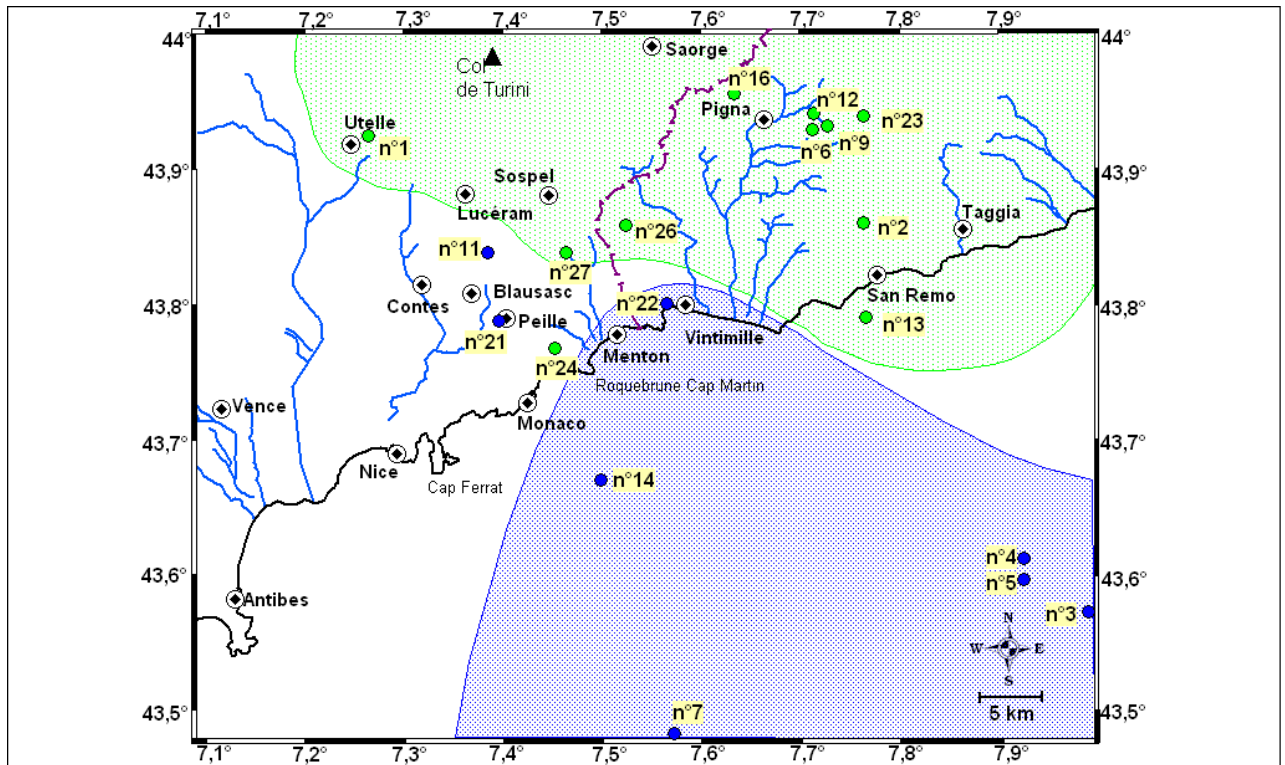


Figure 62 : limite des deux états de contrainte du domaine marin (Tal) et du domaine terrestre (Ter) déterminé par les inversions des mécanismes. Les points rouges et verts représentent les séismes qui ont contribué à la détermination de l'état de contrainte respectivement de Tal et de Ter.

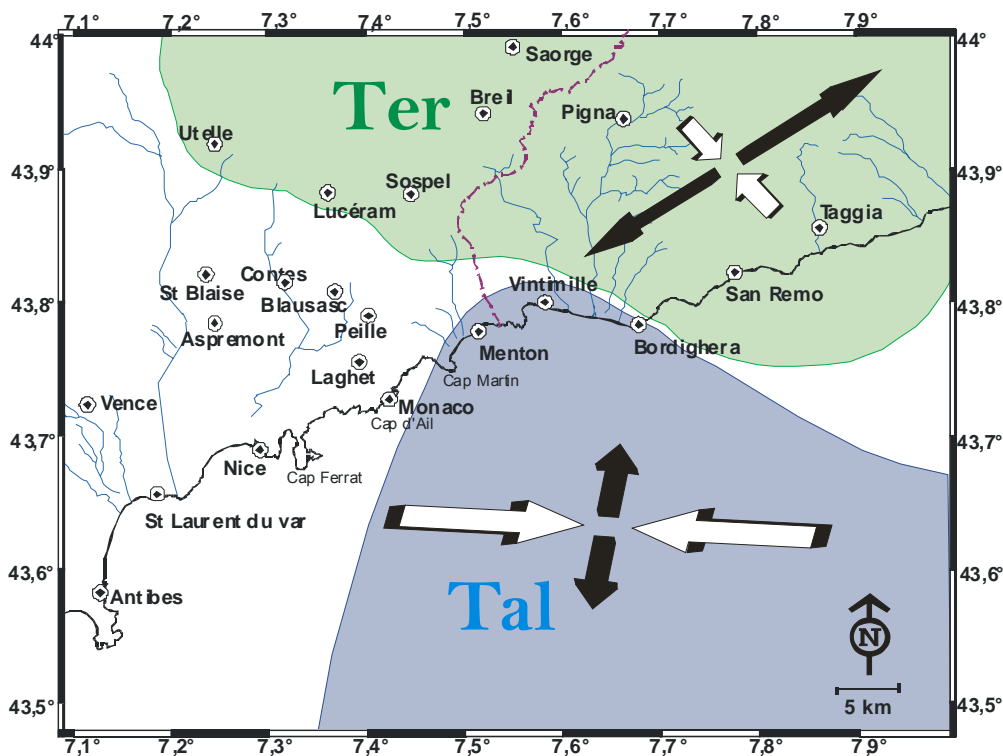


Figure 63 : états de contrainte du domaine marin (Tal) et du domaine terrestre (Ter) déterminés par les inversions des mécanismes. Les flèches blanches et noires correspondent respectivement à la projection de σ_1 et σ_3 dans un plan horizontal.

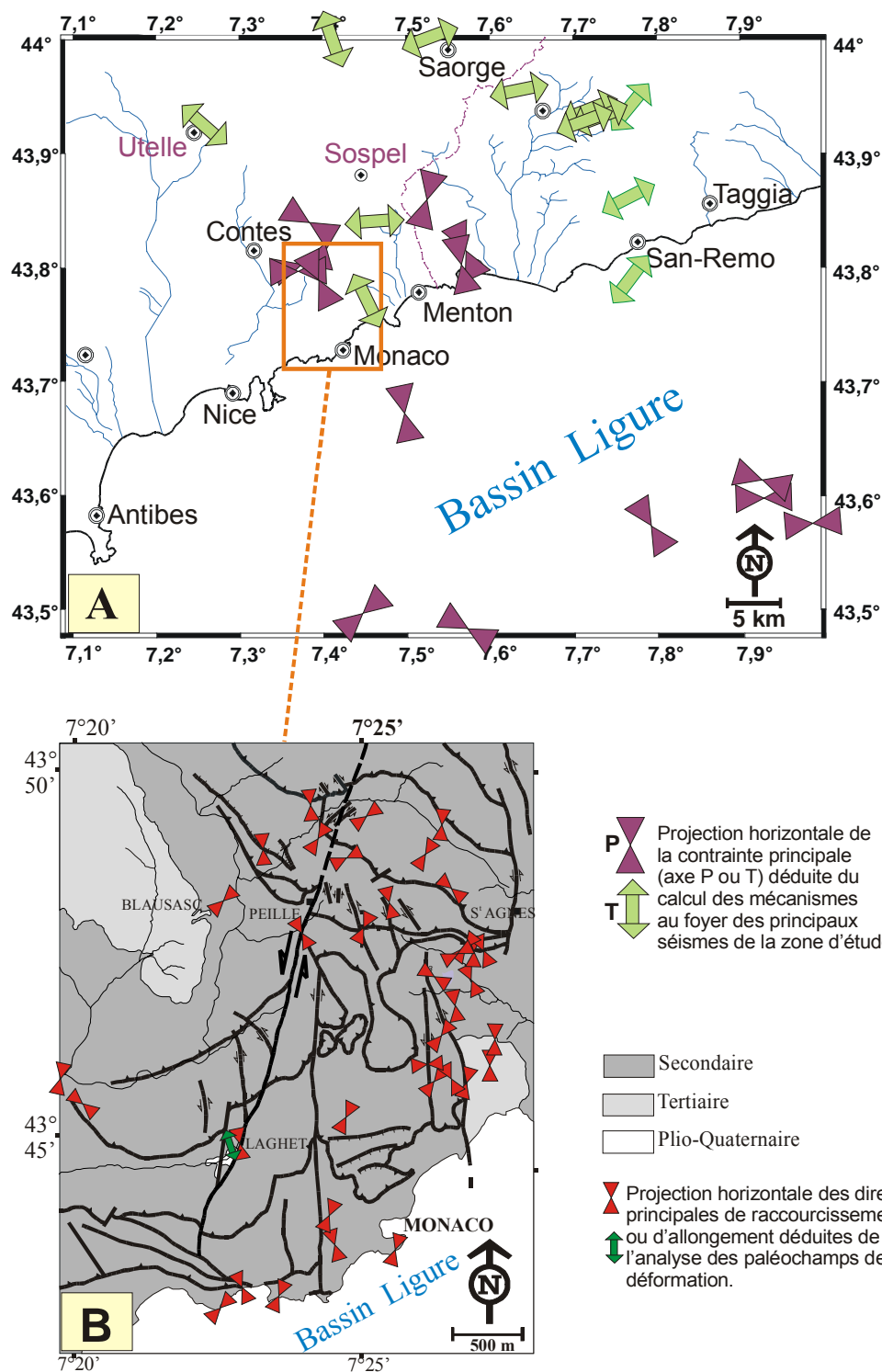


Figure 64 : Projections horizontales des champs de contraintes principaux des séismes pour le sud des Alpes maritimes franco-italiennes (A) et des champs de déformations principaux de la déformation fragile finie autour de Monaco (B).

2.3. Conclusion sur la sismotectonique de la région proche de Monaco

La corrélation entre les mécanismes des séismes, leur localisation et le jeu fini des accidents connus à terre n'est pas toujours aisée.

Dans le domaine terrestre, le secteur d'étude présente un passage progressif :

- de la zone proche Ligurie dominée par les familles d'accidents du type « N140°E Saorge-Taggia » avec des mécanismes au foyer soit décrochants soit extensifs,
- à l'arc de Nice dominé par des directions structurantes N40°E à NS vers l'ouest avec des mécanismes au foyer décrochants.

Au niveau des états de contrainte, nous proposons que le régime extensif observé au niveau de la partie centrale de la chaîne des Alpes Occidentales (Calais *et al.*, 2001 ; Nocquet *et al.*, 2003) le soit également dans la partie orientale des Alpes maritimes franco-italiennes. Nous avançons comme hypothèse un changement récent de la dynamique dans notre région avec des champs de déformations, mesurés autour de Monaco, présentant des raccourcissements dominants variants autour de la direction nord-sud alors que l'état de contrainte est extensif suivant une direction sud ouest – nord est.

Dans le domaine marin, le manque de données ne permet pas l'identification ou la caractérisation des failles qui jouent actuellement en compression et décrochement.

A terre, les événements sismiques les plus importants dans notre secteur d'étude à savoir le séisme du 21 avril 1995 et la crise sismique de Blausasc ont présenté tous deux un alignement de séismes sur la direction N110°E qui a permis de retenir comme actif ce plan de faille proposé par le calcul des mécanismes au foyer (Couboulex *et al.*, 1998, 2003). De même lors de la crise sismique de la Roya en 1983, l'alignement des séismes s'est fait suivant cette même direction et c'est le plan nodal N110°E qui a été retenu (Hoang-Trong *et al.*, 1987). A proximité de la faille de Saorge-Taggia réputée comme étant une des plus actives de la région, des failles métriques N90-100°E, sub verticales, décrochantes dextres probables, affectent le Pliocène (Dubar et Guglielmi, 1991).

Le secteur d'étude pourrait s'organiser à terre autour d'un canevas réghmatique mis en évidence dans l'étude microtectonique autour de directions structurantes majeures reconnues en surface au travers de grandes familles linéamentaires et dans l'étude sismotectonique et géomatique au travers de directions mobilisées récemment par des séries d'accidents dont très peu sont visibles.

Notre analyse tectonique et sismique confirme donc que les Alpes maritimes franco-italiennes ont été et demeurent sismiquement actives le long des grands couloirs linéamentaires orientés N120-140°E, N40°E, et N160-170°E (Guardia et Ivaldi, 1996), mais que les directions N100-110°E peu marquées au niveau de la déformation fragile finie mais bien marquées au niveau de l'analyse géomatique, ont dans la dynamique actuelle de la région un rôle essentiel.

3. Synthèse sur les principaux accidents mis en évidence dans la région.

Les grands alignements ou les grands accidents de la région qui peuvent présenter un risque s'ils étaient amenés à jouer sur une grande partie de leur longueur sont représentés par deux familles :

- la famille d'accidents actifs où de la sismicité a été enregistrée à leurs abords immédiats, il s'agit des deux accidents sub-méridiens de Peille - Laghet et celui de Monaco - Sospel –Breil - Saorge,
- la famille d'accidents potentiellement actifs où aucune sismicité n'a été clairement identifiée à leurs abords. Cependant leur réalité tectonique démontrée fait de ces accidents des zones de faiblesse. De plus des arguments morphologiques permettent de penser que leur activité est récente. Il s'agit des grands alignements N100°E.

3.1. L'accident de Monaco – Sospel – Breil - Saorge

Si la branche nord de cet accident à savoir la section Sospel - Breil - Saorge peut être considérée comme active avec le début de la crise sismique de 1983 localisée aux environs de Sospel (Hoang-Trong *et al.*, 1987), aucune activité sismique n'a par contre été clairement établie pour la section Sospel-Monaco. Nous avons cependant observé sur les images satellitales et sur le terrain la continuité de cet accident entre Monaco et la section Ste-Agnès – Sospel.

Sur le terrain, la faille du Larvotto a été clairement identifiée à Monaco lors de la construction récente du Forum Grimaldi (1999). Les fouilles de cet édifice ont mis en évidence sur le site, un contact de direction N20°E, vertical, entre des calcaires marneux Sénonien côté Est et des calcaires et dolomies jurassiques côté Ouest. Ce contact est tronçonné par des fractures de directions méridiennes. L'analyse des miroirs de la faille du Larvotto a montré que son jeu a été polyphasé : décrochant senestre sur des stries sub-horizontales et inverse sur des stries inclinées à 45° (Comm. orale J.L. Perez, 2002). Ce dispositif structural explique par ailleurs la présence de la nappe d'eau douce karstique du Larvotto bloquée dans sa progression vers l'Est par la présence des marnocalcaires crétacés ramenés par la faille au contact du Jurassique. La faille du « Larvotto-Mont Gros » est à ranger dans la famille linéamentaire NE-SO à jeu décrochant senestre du réseau réghmatique régional.

La faille du Larvotto NNE-SSO se prolonge vers le nord par l'accident de même direction du Mont-Gros. Elle est tronçonnée par de multiples accidents NS constituant la zone faillée « Pointe de la Veille-Gorbio » qui sépare le Jurassique du mont Gros du miocène de Roquebrune-Cap-Martin. La faille du Larvotto et sa continuité au niveau du mont Gros peuvent être suivies au-delà de la zone faillée NS (Pointe de la Veille-Gorbio). Sur le terrain cette faille est soulignée par la présence de miroirs striés dans les marno-calcaires du Crétacé supérieur à l'entrée nord du tunnel autoroutier de la Coupière. Perez (1975) avait également mis en évidence lors du creusement du tunnel autoroutier la continuité de cet accident, dans le bassin de Gorbio, de Monaco jusqu'à Ste Agnès. Sur les images satellitales et aériennes elle se traduit par une succession d'alignements morphologiques plurihectométriques définissant

notamment l'abaissement du col de la Coupière. Sur sa terminaison nord, près du village de Ste Agnès la faille du Larvotto-Mont Gros bute sur l'accident méridien Ste Agnès-Sospel.

Cet exemple montre bien que les formations compétentes telles que les calcaires jurassiques marquent nettement, au travers de fractures, le passage d'une faille qui s'amortira dans les marnes du Crétacé et sera plus difficile à suivre (Perez, 1975). Il faut donc prendre en compte le rôle tampon du Crétacé supérieur, mais également de l'ensemble des terrains marneux comme ceux du Paléogène, dans la structuration de la région.

Les paléochamps de déformation, définis précédemment, appliqués à la faille « Larvotto-Mont Gros » induisent pour celles-ci les paléojeux suivants :

- des paléojeux à dominante dextre avant l'aquitainien compte-tenu des raccourcissements NE-SO en limite angulaire par rapport à l'orientation générale de l'accident.
- des paléojeux à dominante senestre après l'aquitainien en fonction des raccourcissements NS.

L'accident Monaco – Sospel – Breil – Saorge ne présente pas d'activité sismique dans sa partie méridionale et il est peu marqué au niveau de l'analyse géomatique. Sa continuité de Saorge à Monaco et au delà par un canyon sous-marin en font toutefois un accident régional majeur. Il pourrait être remobilisé lors d'un événement plus important ayant son épicerne au nord de Sospel, ou même lors d'une secousse majeure au niveau de l'accident Saorge-Taggia.

3.2. Les accidents de Peille - Laghet et Peille- Cap d'ail.

La faille active de Blausasc mise en évidence lors de la crise sismique de décembre 2000 est éloignée de 2 km de la faille de Peille – Laghet qui en est son héritage de surface. Cette crise a mis en évidence des directions N20°E et N110°E avec des mécanismes décrochants compatibles avec une direction de raccourcissement subméridienne (Calais *et al.*, 2000 ; Larroque *et al.*, 2001) et un champ de contrainte σ_1 NS au Plio-Quaternaire (Ritz, 1992).

Nous avons pu montrer par les analyses des miroirs striés dans le proche environnement de ces accidents que l'axe de raccourcissement (λ_3) de la déformation fragile présente deux orientations différentes NE -SO et NO-SE. De tels raccourcissements inversent le jeu de ces accidents sub-méridiens. Ces accidents ont joué en décrochement à la fois dextre et senestre. Les mesures effectuées sur des formations Plio-Quaternaire montrent que ces inversions se sont notamment produites dans un passé récent que l'on peut évaluer au dernier million d'années écoulées.

L'analyse géomatique a montré que ces accidents sont visibles mais peu marqués. Le décalage de la trace de surface par rapport à la partie active pourrait expliquer le « gommage » de la trace de surface inactive depuis longtemps. La partie active de la faille (située à 2 km à l'Ouest environ de la trace de surface) n'apparaît pas non plus au niveau de l'analyse géomatique. Durant la crise sismique elle a joué de 3 à 0,5 km de profondeur et correspond en surface à la morphologie de la vallée du Paillon (Courboux *et al.*, 2003).

3.3. Les accidents N100°E « Col Saint Michel – Sospel » et « Paillon - Monaco »

L'accident N100°E reconnu par l'analyse géomatique sur les documents depuis le Col St Michel jusqu'à Sospel est l'alignement majeur de la région et l'un des plus visibles (Figure 36). Il s'agit d'un accident tectonique à jeu ou rejeu récent, marquant fortement la morphologie sans pour autant décaler nettement les structures géologiques. Situé au plus près à 16 kilomètres de Monaco et d'une longueur de plus de 20 kilomètres, son éventuelle activité sismique reste toutefois à démontrer.

Des indices morphologiques et tectoniques ont convergé dans le sens du jeu récent de cet accident : le décalage du tracé des cours d'eau, la présence de chutes d'eau au passage de l'accident, des décalages de bancs calcaires, la présence de segments d'accidents Est - Ouest, des affaissements de compartiment le long des vallons orientés également Est – Ouest sont autant d'indices qui mériteraient pour chacun d'eux une étude spécifique afin de confirmer sa fraîcheur.

Si cet accident s'avérait être actif, il pourrait expliquer en partie un certain nombre de séismes tel celui de 1618 où beaucoup de localités touchées se situent à sa proximité. Les zones fortement urbanisées à une dizaine de kilomètres et la longueur de cet alignement devraient en faire une priorité pour les études futures de l'aléa sismique dans la région.

L'alignement "Paillon - Monaco" plus au sud appartient à la même famille, sa trace morphostructurale reste cependant moins importante que celles des accidents septentrionaux dits du "Col Saint Michel - Sospel" et de "Belvédère Carno Gervontina".

L'importance de ces accidents Est-Ouest dans l'évolution géodynamique du Sud-Est de la France n'est plus à démontrer comme nous l'avons rappelé plus haut. Dans les Alpes maritimes franco-italiennes, leur jeu s'estompe progressivement en direction du Sud. Nous posons comme hypothèse que cette évolution spatiale est en relation avec le degré d'éloignement de la terminaison Sud du massif Cristallin externe de l'Argentera dont on connaît par ailleurs l'influence sur l'accident de "Belvédère Carno Gervontina" et la surrection récente, intervenue à partir du Paléogène (Guardia et Ivaldi, 1996). Une telle hypothèse a pour conséquence une activité sismique décroissante de ces accidents Est-Ouest en direction du sud. Nous pensons cependant que ces directions sont toujours actives, les études réalisées sur les trois séismes majeurs de ces dernières années ont mis en évidence un plan de faille actif à N110°E.

CHAPITRE 5 : DETERMINATION DU SEISME DE REFERENCE POUR MONACO

L'objectif est de déterminer les caractéristiques des séismes qui pourraient avoir lieu autour de Monaco. Nous parlerons de séismes hypothétiques et de séisme de référence.

Les séismes hypothétiques sont les séismes majeurs qui n'ont pas eu lieu depuis au moins 500 ans et qui au vu de la connaissance sismotectonique de la région semblent plausibles.

Le séisme de référence est le séisme hypothétique qui par les caractéristiques du mouvement sismique qu'il engendrerait sur la Principauté infligerait le maximum de dommages pour le bâti et la population.

Le choix de ce séisme découle de l'analyse des résultats de l'ensemble des domaines étudiés précédemment qui concernent l'aléa régional à savoir : l'état des connaissances en matière de paléotectonique et de tectonique actives régionales et locales, l'analyse géomatique de la déformation fragile, et l'analyse structurale, microstructurale et sismotectonique.

La quantification de ces résultats se fera par l'application de lois d'atténuation.

1. Application des lois d'atténuation existantes

En sismologie, les lois d'atténuation sont des expressions analytiques qui permettent de calculer un paramètre du mouvement du sol (valeurs de pic de l'accélération par exemple) en fonction d'un certain nombre de paramètres caractérisant le séisme et la propagation des ondes sismiques entre la source et le site étudié.

Les lois d'atténuation empiriques sont généralement établies par régression statistique à partir d'une base de données d'enregistrements. Ces lois font intervenir en général la magnitude (pour caractériser la source) et le paramètre de la distance (pour caractériser la propagation).

L'objectif de ce chapitre est de fournir, par le calcul, des paramètres du mouvement sismique sur Monaco qui n'ont pas été mesurés sur le territoire. Ces événements ainsi quantifiés seront hiérarchisés.

Les paramètres du mouvement sismique calculés par les lois d'atténuation sont l'accélération et la vitesse pouvant être atteintes sur le site de la Principauté.

Dans notre zone de sismicité moyenne, ces lois d'atténuation vont être utilisées dans deux domaines distincts :

- au niveau de la sismicité historique, l'objectif est de réaliser un classement des principaux séismes qui ont touché Monaco par le calcul de leurs accélérations à partir des données disponibles, en l'occurrence ici la base de donnée SISFRANCE 2003 (Lambert, 2003),
- au niveau de la sismicité instrumentale, l'objectif est de déterminer par le calcul les accélérations et les vitesses des séismes principaux de ces 50 dernières années.

De plus l'exploitation des enregistrements sismiques sur le territoire permettra d'adapter une loi d'atténuation de la littérature. Cette dernière permettra d'appréhender les vitesses qui pourraient être atteintes sur Monaco lors d'un événement sismique particulier.

1.1 Détermination des vitesses et/ou accélérations atteintes sur Monaco par l'application des lois existantes sur des séismes non mesurés à Monaco.

Ces lois sont des relations empiriques proposées par plusieurs auteurs. Elles ont été établies pour des régions bien déterminées et dans une certaine gamme de magnitudes et de distances à la source. On en retiendra six parmi les plus récentes.

Toutes ces lois (Figure 65) ont été mises sous la même forme fonctionnelle à huit coefficients (Betbeder-Matibet et Bour, 2002) :

$$Y = c \cdot e^{\alpha M} \left(R^k + a e^{\delta M} \right)^{-\beta} \cdot e^{-\gamma (R^k + b)^{1/k}}$$

Loi	c	α	k	a	δ	β	γ	b	σ
A Petrovski (1986)	6,54	0,544	1	20	0	1,133	0	0	1,958
A Tonto-Franceschina-Marcellini (1992)	1,133	0,52	1	0	0	1	0,00216	0	1,954
A Ambraseys (1995)	0,364	0,564	2	7,29	0	0,399	0,00237	7,29	1,742
V Petrovski (1986)	4,43	0,936	1	20	0	1,379	0	0	2,103
V Sabetta-Pugliese (1987)	0,195	1,048	2	12,96	0	0,5	0	0	1,64
V Theodulidis-Papazachos (1992)	0,364	1,41	1	10	0	1,62	0	0	2,226

Figure 65 : Formule du mouvement prédit avec tableau des valeurs des coefficients pour les six lois retenues avec Y le paramètre de mouvement prédit (accélération A en m/s², vitesse V en cm/s), M la magnitude et R la distance (en km).

Loi	M min	M max	R min	R max
A et V Petrovski (1986)	3	6.8	10	100
A Tonto-Franceschina-Marcellini (1992)	4	6.6	8	100
A Ambraseys (1995)	4	7.5	1	200
V Sabetta-Pugliese (1987)	4.5	6.8	1	200
V Theodulidis-Papazachos (1992)	4.5	6.8	1	200

Tableau 7 : Limites de validité des principales lois retenues avec M : Magnitude ; R : distance épacentrale en km ; A : accélération ; V : vitesse.

1.1.1. Application des lois d'atténuation pour la sismicité historique

L'objectif est de déterminer avec l'aide des lois d'atténuation le séisme historique qui a atteint les plus fortes accélérations en Principauté.

Chapitre 5 : Détermination du séisme de référence pour Monaco

L'application des lois d'atténuation est le moyen de convertir des données qualitatives historiques en valeurs pouvant être hiérarchisées.

Cette analyse s'est faite grâce à la collaboration du Service Aménagement et Risques Naturels du BRGM qui a extrait les données épicentrales de la base de données SisFrance 2003 pour la région autour de Monaco entre la longitude 5°37 et 9°13 et la latitude 41°55 et 45°31 soit plus de 200 séismes recensés.

La base de données SisFrance 2003 sur la sismicité du territoire métropolitain français livre un état des connaissances sur plus de 6000 séismes ressentis depuis plus de 1000 ans en France Métropolitaine et sur ses marges frontalières. Elle contient une mise à jour permanente de tous les événements sismiques répertoriés en France en donnant la localisation des séismes, leur date et heure, ainsi que leur intensité avec un code de qualification.

L'objectif est la définition des accélérations maximales sur Monaco des séismes majeurs à partir de leurs caractéristiques (localisation et intensité épicentrale) répertoriées dans la base de donnée SISFRANCE 2003. Nous déterminerons :

- la magnitude en fonction de l'intensité,
- la distance épicentrale par rapport à Monaco en fonction de la localisation,
- les accélérations atteintes par ces séismes par l'application de lois empiriques.

- Détermination des magnitudes en fonction des intensités sur le lieu épicentral

La magnitude théorique intégrée dans ces lois a donc été déduite de l'intensité qui n'est pas la mesure d'un paramètre physique caractéristique du séisme. Cela a pour conséquence qu'un même niveau d'intensité, en un site donné, peut correspondre à des séismes de caractéristiques très variées et donc à des mouvements sismiques très différents par leurs durées, leurs périodes dominantes d'oscillation et leurs amplitudes en accélération.

Les intensités utilisées dans ces calculs sont déterminées à partir de données macrosismiques tirées de l'analyse d'archives de plus de 100 ans, donc forcément imprécises. De plus les coordonnées géographiques de ces événements sont données par rapport à la zone de dégâts maximum qui n'est pas toujours représentative de l'hypocentre.

Toutefois, l'application de ces lois permet de donner une estimation de l'ordre de grandeur des accélérations, et surtout des indications relatives quant à l'importance de ces séismes en un site donné.

Différentes lois de corrélation existent entre intensité et magnitude, elles donnent toutes, à peu près, le même résultat. C'est la loi de Despeyroux-Godefroy (1986) qui sera retenue dans la suite de cette étude avec $M = 0,5 I + 1,5$ (M la magnitude et I l'intensité).

- Détermination de la distance épicentrale par rapport au site de Monaco

Pour chaque séisme, en fonction des coordonnées de Monaco et de celles de l'épicentre données par la base de données SisFrance 2003 (Lambert, 2003), est déduite la distance épicentrale qui sera prise en compte dans le calcul de l'accélération.

Chapitre 5 : Détermination du séisme de référence pour Monaco

- Détermination de l'accélération engendrée par ces séismes au niveau de Monaco

L'estimation de l'accélération maximale provoquée par des séismes se fait par l'application des lois d'atténuation qui sont fonctions de la distance du site à l'épicentre et de la magnitude.

A partir des séismes recensés dans notre zone d'étude, nous allons identifier par le calcul les séismes majeurs qui ont présenté les accélérations maximales en Principauté durant ces 500 dernières années.

Dans l'application de ces lois nous avons pris en compte uniquement les séismes de magnitude supérieure ou égale à 5. Les séismes de magnitude inférieure, ne peuvent être destructeurs que localement et à la condition qu'ils soient très superficiels. Pour le calcul de la magnitude en fonction de l'intensité (IEPC) c'est la loi de Despeyroux-Godefroy qui a été utilisée.

AN1	MM1	JJ1	HH1	MN1	Qp	Long en °	Lat en °	D epi en km	Qi	IEPC	M	APPELATION
1618	1	18	5		D	7,28	43,88	23,51	C	8	5,5	COARAZE
1494	6	23			D	7,32	43,98	31,40	C	8	5,5	ROQUEBILLIERE
1564	7	20	20		D	7,32	44,00	33,13	C	8	5,5	BOLLENE-VESUBIE
1644	2	15	4	30	C	7,22	43,95	33,95	C	8	5,5	ROQUEBILLIERE
1887	2	23	5	50	C	8,00	43,83	64,33	K	9	6	IMPERIA-BUSSANA
1831	5	26	11	30	B	7,08	43,85	39,42	B	8	5,5	BUSSANA
1963	7	19	5	46	D	8,02	43,28	76,22	E	7,5	5,3	S. IMPERIA

Qp : indice de fiabilité des coordonnées de l'épicentre (A : sûr; B : assez sûr; C : incertain ;D : imprécis)

Qi : indice de fiabilité dans l'évaluation de l'intensité épicentrale (A : sûr; B : assez sûr ; C : incertain ; K : issu d'un calcul (loi d'atténuation) ; E : arbitraire).

Tableau 8 : Caractéristiques des principaux séismes tirées de la base de données SisFrance 2003. Classement établi en fonction des accélérations calculées sur Monaco.

AN1	MM1	JJ1	Accélération Petrovsky (1986) en m/s ²	Accélération: Tonto-Franceschina-Marcellini (1992) en m/s ²	Accélération Ambraseys (1995)
1618	1	18	0,85	0,90	0,64
1494	6	23	0,68	0,59	0,50
1564	7	20	0,65	0,56	0,48
1644	2	15	0,64	0,54	0,47
1831	5	26	0,56	0,46	0,41
1887	2	23	0,46	0,35	0,35
1963	7	19	0,27	0,20	0,20

Tableau 9 : Tableau des accélérations maximales au niveau de Monaco calculées et classées par ordre d'importance décroissante avec les différentes lois d'atténuation à partir des données brutes de la base des données SisFrance 2003.

Ces trois lois, définies pour la région Europe, Proche et Moyen Orient, donnent des résultats similaires et fournissent le même classement pour les séismes les plus importants (en terme d'accélération) qui ont affecté Monaco.

Chapitre 5 : Détermination du séisme de référence pour Monaco

Les six séismes les plus importants (Tableau 9) correspondent à ceux déjà connus dans la littérature scientifique de la région (Laurenti, 1998 ; Larroque, 2000) et ont déjà été décrits dans le **chapitre 2**. Le séisme du 19 juillet 1963 a dans ces tableaux une magnitude calculée de 5.3 alors qu'elle est de 6 mesurée. Cette différence s'explique par la localisation de cette secousse au large et la détermination de la magnitude par rapport à l'intensité mesurée à terre. Cet exemple doit nous inciter à la prudence lors de l'exploitation des magnitudes calculées des séismes historiques.

Sur ces six événements cinq ont les mêmes intensités (VIII) et donc les mêmes magnitudes estimées (5.5). Seul le séisme du 23 février 1887 a atteint l'intensité IX avec une magnitude estimée de 6. Cinq des séismes les plus importants en terme d'accélération sur Monaco sont situés entre 20 et 40 km de Monaco. Seul celui du 23 février 1887 est localisé à une soixantaine de km ce qui explique sa sixième position malgré sa magnitude la plus élevée. Notons toutefois que ces séismes ont un indice de fiabilité des coordonnées de l'épicentre imprécis ou au mieux incertain et que l'indice de fiabilité dans l'évaluation de l'intensité épicentrale est généralement incertain.

En conclusion nous pouvons proposer malgré les importantes incertitudes qui caractérisent les paramètres de base (intensité, localisation) :

- une identification par le calcul des événements principaux qui ont touché le plus durement la Principauté depuis 500 ans,
- des valeurs calculées pour les accélérations maximales des principaux séismes historiques de $0,6 \pm 0,2 \text{ m/s}^2$ environ par application des lois de Petrovsky (1986), Tiento-Franceschina-Marcellini (1992) et Ambraseys (1995).

L'application de ces lois montre que les principaux séismes historiques ont tous présenté une accélération sur Monaco du même ordre de grandeur. Ils devraient être en terme de dégâts similaires à celui de 1887. Comme cela avait déjà été évoqué précédemment, excepté le séisme de 1887, nous n'avons retrouvé aucune trace de tous ces autres séismes dans les archives ecclésiastiques et dans celles du Palais. Les effets de ces différents séismes sur Monaco ont vraisemblablement été très faibles. Toutefois sans remettre en doute leur réalité, nous pensons que les incertitudes qui les concernent sont telles, qu'il est préférable de ne conserver que le séisme Ligure du 23 février 1887 comme le séisme historique qui a produit le plus de dégâts sur Monaco.

1.1.2. Application des lois d'atténuation pour la sismicité de ces 50 dernières années

Comparés aux séismes historiques la localisation et la magnitude des séismes enregistrés sont relativement précises.

L'objectif est le même : classer les événements instrumentaux par rapport à leurs effets sur Monaco.

La méthode est identique : appliquer les principales lois d'atténuation pour la détermination par le calcul de l'accélération atteinte sur le territoire de Monaco.

Les données disponibles sont celles du Bureau Central Sismologique Français (BCSF), du Réseau National de Surveillance sismique (RéNaSS) et des différentes études qui ont précisé les paramètres des événements principaux (Bethoux, 1992 ; Courboulès 1998, 2003 ; Larroque, 2001).

Chapitre 5 : Détermination du séisme de référence pour Monaco

Les principales lois d'atténuation sont appliquées pour les principaux séismes enregistrés depuis 1963 afin de calculer l'accélération atteinte sur le Rocher à Monaco (Tableau 10). Les conditions aux limites choisies pour satisfaire ces lois sont une magnitude supérieure à 4 et une distance épacentrale inférieure à 200 km. Le principal séisme de la crise sismique de Blausasc et le petit séisme de Peille ne sont donc pas pris en compte (Magnitude de 3.7).

date	M	Lat en °	Long en °	Distance épacentre en km	Azimet en°	Accélération : Petrovsky, 1986 en m/s ²	Accélération: Tento <i>et al.</i> , 1992. en m/s ²	Accélération : Ambraseys, 1995 en m/s ²
21/04/1995	4,7	43,8155	7,5563	18,49	55	0,650	0,678	0,494
25/02/2001	4,5	43,49	7,47	26,15	168	0,457	0,425	0,331
26/12/1989	4,5	43,483	7,561	30,64	149	0,404	0,359	0,290
15/04/1990	4,3	43,574	7,774	42,54	112	0,274	0,227	0,195
07/04/1966	4,4	44,12	7,39	44,56	356	0,277	0,228	0,198
19/07/1963	6,0	44,33	8,11	102,32	49	0,282	0,201	0,222
18/04/1968	4,5	43,95	8,13	82,92	72	0,157	0,119	0,117
11/11/1997	4,0	44,1	7,9	68,02	52	0,147	0,115	0,107
01/02/1971	4,3	44,43	7,41	78,89	359	0,149	0,113	0,110
04/10/1985	4,1	43,63	8,09	75,11	98	0,140	0,108	0,103
10/10/1980	4,3	44,45	7,15	86,47	340	0,135	0,102	0,101
22/04/1981	4,5	43,31	8,23	100,86	117	0,127	0,094	0,096
18/01/1972	4,6	44,11	8,3	106,94	66	0,125	0,092	0,096
06/02/1977	4,0	44,49	7,34	86,01	354	0,115	0,088	0,085
05/01/1980	5,3	44,98	7,47	140,10	2	0,135	0,094	0,107
31/12/1970	4,2	44,16	8,28	107,33	63	0,100	0,074	0,076
08/02/1974	4,3	44,15	6,48	114,84	295	0,098	0,072	0,075
24/02/1997	4,1	43,7	8,5	120,01	91	0,084	0,061	0,064
21/08/2000	5,0	44,89	8,28	161,32	36	0,097	0,067	0,077
20/03/1983	4,1	44,34	6,48	125,10	303	0,080	0,058	0,061
06/06/1971	4,2	44,66	6,68	132,91	322	0,079	0,057	0,061
05/09/1963	4,2	44,65	8,23	137,02	41	0,076	0,055	0,059
19/06/1984	4,3	44,05	6,15	145,78	285	0,075	0,053	0,058
03/03/1977	4,0	44,69	6,69	134,88	323	0,069	0,050	0,053
30/06/1984	4,1	44,05	6,13	147,93	284	0,066	0,047	0,051
18/07/2001	4,1	44,85	8,33	161,19	39	0,059	0,042	0,046
10/10/1997	4,5	42,2	6,6	191,88	208	0,060	0,040	0,047

Tableau 10 : Classement par ordre décroissant des accélérations calculées avec différentes lois d'atténuation (Petrovsky, 1986 ; Tento-Franceschina-Marcellini, 1992 ; Ambraseys, 1995) pour les séismes de magnitude supérieure à 4 et de distance épacentrale inférieure à 200 km par rapport à Monaco.

C'est donc le séisme du 21 avril 1995 localisé au nord de Vintimille qui aurait présenté les accélérations les plus importantes en Principauté suivi par celui du 25 février 2001 localisé à une trentaine de km au large de Monaco. De suite après nous trouvons les séismes de la mer Ligure de décembre 1989 et avril 1990 puis celui du 19 juillet 1963, localisé à plus de 100 km de la Principauté.

Chapitre 5 : Détermination du séisme de référence pour Monaco

1.1.3. Synthèse des accélérations maximales calculées par les lois d'atténuation pour les séismes principaux

L'application des lois d'atténuation, aux séismes historiques principaux ayant affecté la Principauté, et aux séismes hypothétiques, permet de proposer une échelle relative des effets sur la Principauté de ces divers séismes (Tableau 11).

Toutefois, si les failles actives sont reconnues il est difficile d'évaluer correctement leur potentiel sismogène et donc de déterminer précisément les caractéristiques du séisme hypothétique. Le seul cas particulier étant celui de la faille de Blausasc dont la crise sismique en 2000 a été très bien contrainte durant la campagne SALAM et qui a permis de proposer une magnitude si la zone activée durant cette crise jouait en une seule fois (Courboux *et al.*, 2003).

Les séismes hypothétiques pris en exemple ici sont celui de la faille de Blausasc et celui actuellement pris en compte pour la réglementation parasismique à Monaco :

- le séisme hypothétique de Blausasc mis en évidence lors de la crise sismique de décembre 2000 et déterminé par la rupture en une seule fois de la portion de faille activée lors la crise sismique de Blausasc (3 km) générerait un séisme de magnitude 5.5 (Courboux *et al.* 2003),
- le séisme de référence actuellement pris en compte à Monaco pour l'application de la réglementation parasismique est un séisme de magnitude 6.5 à 30 km.

Nous considérerons dans la suite de cette étude que le séisme hypothétique de Blausasc rentre dans les limites de validité des lois d'atténuation même s'il est en bordure (Tableau 7).

Caractéristiques	Magni-tude	Distance épïcêtre	Vitesse au Rocher en cm/s		Accélération au Rocher en m/s ²	
			mesuré	calculé	mesuré	calculé
Faille de Blausasc (hypothèse)	5.5	8	/	7,70 (P) 7,08 (SP.) 7,86 (Tp)	/	1,53 (P) 2,43 (T) 1,48 (A)
Séisme de référence pris en compte actuellement à Monaco	6.5	30	/	8,83 (P) 5,86 (SP.) 8,83 (Tp)	/	1,22 (P) 1,04 (T) 0,91 (A)
Séisme du 23 février 1887	6	65	/	2,67 (P) 1,61 (SP) 1,58 (Tp)	/	0,46 (P) 0,34 (T) 0,35 (A)
Séisme du 21 avril 1995	4.7	18,5	/	2,35 (P) 1,43 (SP) 1,21 (Tp)	/	0,65 (P) 0,68 (T) 0,49 (A)
Séisme du 19 décembre 2000	3.7	8	saturé	hors limite	0,18 (Mona)	hors limite
Séisme du 25 février 2001	4.6	25	0,05	1,36 (P) 0,72 (SP) 0,53 (Tp)	0,1 (Fonv)	0,49 (P) 0,46 (T) 0,31 (A)
Séisme du 11 avril 2003	4.9	200	0,041	0,24 (P) 0,16 (SP) 0,06 (Tp)	0,015 (Mona)	0,067 (P) 0,044 (T) 0,0052 (A)

Tableau 11 : Tableau présentant les accélérations et les vitesses maximales mesurées et calculées avec les lois d'atténuation de Petrovsky, 1986 (Pa et Pv); Tenta-Franceschina-Marcellini, 1992 (T) ; Ambraseys, 1995 (A) ; Sabetta-Pugliese, 1987 (SP) ; Theodulidis-papazachos, 1992 (Tp) ; pour des séismes caractéristiques sur la Principauté (jaune : séismes hypothétiques, rouge : séisme historique, bleu : séismes instrumentaux).

Dans le cadre de la réglementation parasismique, une étude du CETE de 1996, définissait une accélération maximale de $1,6 \text{ m/s}^2$ pour servir de base à l'élaboration des spectres donnés pour les différentes zones de la Principauté (CETE, 1996). Une nouvelle étude en 2002, dans ce même cadre, redéfinissait un spectre au rocher « calé » sur une accélération maximale de 1 m/s^2 . La confrontation avec des enregistrements réels de magnitudes équivalentes à celle du séisme de référence (6.3) situés à des distances comparables (28 km) proposait de retenir finalement une accélération de $1,5 \text{ m/s}^2$ (JPM, 2002).

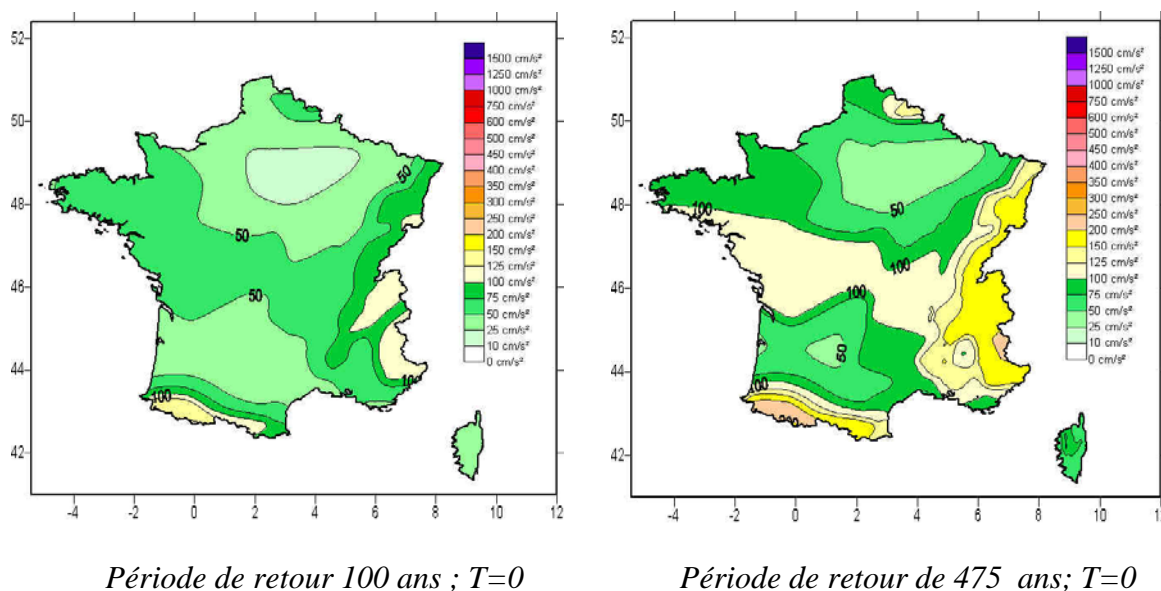


Figure 66 : cartes moyennes finales des accélération attendues pour la France métropolitaine pour des périodes de retour de 100 ans et de 475 ans (zonage probabiliste Géoter, 2002).

Au vu du tableau des valeurs caractéristiques (Tableau 11) et des cartes moyennes du zonage probabiliste Géoter (Figure 66), les valeurs mesurées et calculées des accélération maximales sont conformes aux valeurs des accélération proposées par le zonage probabiliste pour notre région :

- pour la période de retour de 100 ans les accélération attendues sur Monaco s'échelonnaient d'après le zonage probabiliste de Géoter de 1 à $1,25 \text{ m/s}^2$. Le séisme de référence actuellement pris en compte à Monaco, à savoir une magnitude 6.5 à 30 km, présenterait une accélération de $1,1 \text{ m/s}^2$ et rentre donc dans cette échelle ;
- pour la période de retour de 475 ans les accélération attendues sur Monaco s'échelonnaient de $1,5$ à 2 m/s^2 . Le séisme hypothétique de Blausasc (magnitude 5.5 à 8 km de Monaco) atteindrait $1,5 \text{ m/s}^2$ (P et A) ce qui est à la limite inférieure de l'échelle proposée par le zonage probabiliste.

Les accélération fortes sur Monaco calculées pour les séismes proches doivent être interprétées avec prudence. Les accélération fortes se rencontrent aussi bien pour des magnitudes moyennes (4.5) que pour des magnitudes fortes (>7). Ce constat est caractéristique du champ proche où l'accélération est contrôlée par la chute de contrainte (Betbeder, 2003). Ceci peut expliquer l'accélération maximale « forte » du séisme de Blausasc qui a atteint $0,018g$ sur le Rocher pour une magnitude de 3.7 à 8 kilomètres de Monaco. Cette secousse très courte n'a généré aucun dégât en Principauté, le potentiel destructeur commence à apparaître lorsque l'accélération perdure dans le temps. Ainsi le

séisme historique du 23 février 1887 de magnitude estimée de 6 pour une distance de 65 km présente une accélération maximale plus faible que celle du 21 avril 1995 de magnitude 4.7 mais localisé à 18,5 km de Monaco. Les dégâts ne sont en rien comparables puisque contrairement à celui de 1887 il n'y a eu aucun dégât pour celui du 21 avril 1995.

L'accélération maximale à elle seule est insuffisante pour qualifier le potentiel destructeur d'un séisme en champ proche. Il est préférable de définir un paramètre temporel caractérisant la partie forte de ce signal, par exemple la durée T_{acc} qui est l'intervalle de temps séparant le premier et le dernier pic d'accélération (en valeur absolue) supérieur à une valeur donnée d'accélération (en général 0,05g).

1.2. Tentative de définition d'une loi d'atténuation adaptée au contexte monégasque

Les lois d'atténuation de la littérature ont été établies pour des régions de forte sismicité bien déterminées (Amérique du Nord ou Italie par exemple). Il n'existe pas de loi d'atténuation dans des régions à sismicité modérée comme la nôtre. En effet ces lois sont établies par régression statistique d'une base de données de nombreux enregistrements ce qui n'était pas le cas de notre région. Cependant, si la sismicité de notre région reste modérée nous possédons depuis une dizaine d'années, avec le développement des réseaux sismologiques, de plus en plus de données sur les séismes enregistrés à Monaco.

A partir de la base de données des séismes enregistrés sur le territoire monégasque, l'objectif est de définir sur le modèle des principales lois d'atténuation de la littérature une loi propre à Monaco qui à défaut d'être juste, car établie pour des magnitudes faibles, aurait pour ambition de donner une tendance quant aux accélérations ou vitesses que pourraient atteindre ces séismes hypothétiques.

La méthodologie adoptée pour les données accélérométriques et les données velocimétriques est la suivante :

- recensements des données accélérométriques et velocimétriques compatibles avec les valeurs aux limites des principales lois d'atténuation ;
- détermination de la loi d'atténuation de la littérature qui s'approche le plus des spécificités monégasques en calculant la moyenne des rapports des paramètres mesurés par ceux calculés ;
- en fonction du nombre de données exploitables, adaptation de cette loi au contexte monégasque ou par défaut appréciation d'une tendance permettant de pondérer plus ou moins les valeurs qui découlent de l'application des lois d'atténuation classiques.

1.2.1. Exploitation des enregistrements accélérométriques sur Monaco

En fonction des enregistrements accélérométriques disponibles sur Monaco nous allons étudier la possibilité d'établir une loi d'atténuation propre à la Principauté qui permettra d'approcher, plus précisément qu'avec les lois classiques, les accélérations maximales que pourrait atteindre un séisme hypothétique sur Monaco.

Les accéléromètres sont adaptés à l'enregistrement des mouvements « forts », le premier accéléromètre a été installé en 2000 sur le terre-plein de Fontvieille, le second en février 2004 dans les grottes du jardin Saint Martin, sur le Rocher de Monaco. Les données disponibles ne concernent donc qu'une dizaine d'événements sur la station de Fontvieille et 5 sur celle du Rocher. Un classement a pu être établi pour ces données en fonction de leur importance au niveau des accélérations enregistrées sur la station de Fontvieille (Tableau 12).

date	heure	M	d epi	acc MONA m/s ²	acc FONV m/s ²
11/04/03	09h27	4,90	210,00	0,0148	0,4210
19/12/00	14h20	3,7	8,68	0,1779	0,3100
24/11/04	23h00	5,9	402	0,0056	0,1630
25/02/01	18h34	4,6	25,33	HS	0,1020
20/12/00	05h45	3	7,45	0,0130	0,0380
14/03/01	07h10	3,9	73	abs	0,0283
19/12/00	00h53	2,8	6,48	0,0140	0,0216
06/02/01	22h28	4	136	abs	0,0205
17/01/01	15h40	2,6	8,68	abs	0,0096
27/07/02	15h23	2,9	43,84	abs	0,0012
18/07/01	22h47	4,1	156	abs	0,0007

Tableau 12 : Accélérations maximales enregistrées sur les voies horizontales du terre-plein de Fontvieille (FONV) et du Rocher (MONA) pour les séismes des années 2000 à 2004. Tri par importance décroissante des accélérations mesurées sur la station FONV.

L'accélération maximale a été enregistrée à Fontvieille lors du séisme d'Asti du 11/04/03 avec 0,42 m/s² tandis que l'accélération maximale enregistrée sur le Rocher l'a été avec le séisme principal de la crise sismique de Blausasc du 19 décembre 2000 avec 0,18 m/s².

Nous avons utilisé pour le calcul de l'accélération maximale les mêmes lois d'atténuation que celles utilisées précédemment pour le calcul de l'accélération maximale à partir de données historiques. Ce sont celles de Petrovsky (1992), Tiento-Franceschina-Marcellini (1992) et Ambraseys (1995). Si l'on s'approche des valeurs limites de ces trois lois en retenant uniquement les événements de magnitude supérieure à 3.7 et de distance épacentrale inférieure à 500 km, seuls six sont exploitables (Tableau 13).

Sur ces six événements, seuls trois ont été enregistrés sur le Rocher, l'objectif ne peut donc pas être atteint. Toutefois il nous a paru intéressant d'appliquer la méthodologie sur les accélérations enregistrées sur le site du terre-plein de Fontvieille sans omettre son pouvoir amplificateur par rapport à un site au rocher.

date	heure	M	Distance épacentrale en km.	accélération MONA en m/s ²	accélération FONV en m/s ²	Accélération : Petrovsky, 1986 en m/s ²	Accélération: Tiento et al., 1992. en m/s ²	Accélération : Ambraseys, 1995 en m/s ²
11/04/03	09h27	4,9	210,00	0,0148	0,4210	0,067	0,044	0,052
19/12/00	14h20	3,7	8,68	0,1779	0,3100	0,56	0,88	0,51
24/11/04	23h00	5,9	402	0,0056	0,1630	0,05	0,02	0,04
25/02/01	18h34	4,6	25,33	HS	0,1020	0,49	0,46	0,36
14/03/01	07h10	3,9	73	abs	0,0283	0,13	0,10	0,09
06/02/01	22h28	4	136	abs	0,0205	0,07	0,05	0,05

Tableau 13 : Accélérations enregistrées sur les sites du Rocher (MONA) et du terre-plein de Fontvieille (FONV), accélérations calculées avec les lois de Petrovsky (1992), Tiento-Franceschina-Marcellini (1992) et Ambraseys (1995).

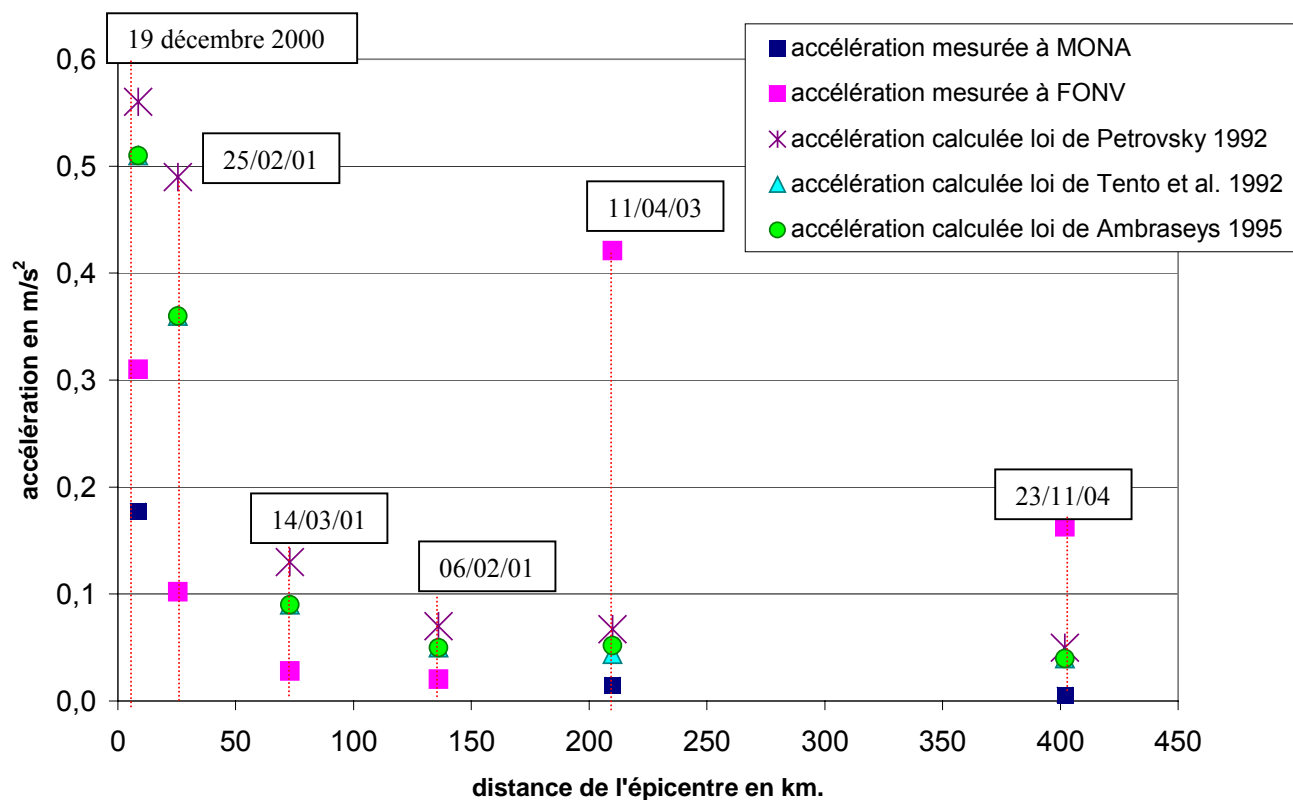


Figure 67 : Les séismes caractéristiques et leurs accélérations en m/s^2 , enregistrées sur les sites du Rocher et du terre-plein de Fontvieille, et calculées au travers des lois de Petrovsky (1992), Tinto-Franceschina-Marcellini (1992) et Ambraseys (1995).

Les accélérations mesurées sur le terre plein de Fontvieille, très amplifiées lorsque la distance épacentrale augmente (Figure 67) seront interprétées ultérieurement dans le **chapitre 6** traitant de l'aléa local.

Les séismes inférieurs à 30 km ont des accélérations calculées par les lois de Petrovsky (1986), Tinto-Franceschina-Marcellini (1992) et Ambraseys (1995) très supérieures aux accélérations mesurées.

Ces comparaisons entre accélérations mesurées et calculées montrent de très grandes disparités. Nous observons une tendance à la surestimation des accélérations calculées par rapport à celles mesurées en champ proche (<30km), et une relative similitude pour les autres séismes (<200km). Il est nécessaire de pérenniser les enregistrements accélérométriques afin d'augmenter le nombre de données qui puissent confirmer cette tendance.

1.2.2. Exploitation des enregistrements vélocimétriques sur Monaco

En fonction des enregistrements vélocimétriques disponibles sur Monaco nous allons voir s'il est possible d'établir une loi d'atténuation qui permettra d'approcher, plus précisément qu'avec les lois classiques établies dans d'autres zones sismiques, les vitesses maximales que pourrait atteindre un séisme hypothétique à Monaco.

La méthodologie décrite précédemment s'applique aux données vélocimétriques de la station sismologique (MONA) enregistrées durant les années 1997-2003.

Le tableau ci-dessous présente la vitesse moyenne des voies horizontales mesurées par la station MONA (balise Hathor 3) couplée avec un géophone vélocimétrique (Mark-Products L4C 1 Hz) dans les grottes du jardin Saint Martin sur le Rocher de Monaco. Les télé-séismes qui n'ont pas d'incidence sur le risque sismique à Monaco n'ont pas été pris en compte, seul le séisme de Boumèrdes et ses principales répliques ressenties en Principauté ont été indiqués à titre de comparaison (Tableau 14).

date	heure	M	lat	Long	D epi	az	V en cm/s
24/02/1997	12:10	4,5	43,71	8,47	116,66	91	0,02477
26/02/1997	17:31	3,7	43,67	8,42	111,24	93	0,00043
26/02/1997	17:34	3,7	43,75	8,52	122,26	88	0,00115
26/02/1997	21:58	3,6	43,54	7,22	29,89	228	0,00131
15/05/1997	00:42	3,8	45,2	6,51	193,02	328	0,00038
26/06/1997	06:08	3,4	43,9	7,34	21,88	336	0,00194
04/07/1997	12:09	2,9	43,89	7,34	20,87	335	0,00057
16/08/1997	11:20	3,1	43,91	7,67	34,89	53	0,00057
02/09/1997	07:35	3,4	43,74	7,84	46,71	87	0,00052
05/09/1997	08:57	3,3	43,88	7,71	36,80	61	0,00108
19/09/1997	10:44	1,5	43,7	7,4	3,14	225	0,00061
31/10/1997	04:23	4,7	44,24	6,59	108,82	302	0,00361
06/11/1997	12:39	3,7	44,41	6,53	125,11	308	0,00055
08/11/1997	01:56	4	44	8,05	76,59	66	0,00683
10/12/1997	21:36	3,3	43,79	7,5	11,81	49	0,01043
03/02/1998	23:38	3,6	43,74	8,37	105,57	89	0,00131
09/02/1998	14:41	3,5	43,21	7,91	78,58	136	0,00062
23/02/1998	09:15	3,1	43,96	7,48	27,48	14	0,00122
11/04/1998	11:05	4	44,59	7,33	97,17	354	0,00152
25/07/1998	20:19	3,7	43,92	7,14	38,23	306	0,00078
01/11/1999	18:11	2	43,77	7,41	5,67	349	0,00083
02/11/1999	02:05	1,9	43,77	7,38	7,11	321	0,00066
19/12/2000	00:17	2,2	43,77	7,38	4,44	270	0,00066
19/12/2000	00:27	2,3	43,77	7,4	2,22	270	0,00066
19/12/2000	00:31	2,2	43,77	7,39	6,48	329	0,00154
19/12/2000	00:52	2,8	43,77	7,39	6,48	329	0,01483
19/12/2000	01:26	2,5	43,77	7,39	6,48	329	0,00278
19/12/2000	14:20	3,4	43,78	7,37	8,68	320	0,05706
19/12/2000	14:27	2,2	43,77	7,37	7,86	315	0,00117
19/12/2000	19:06	2	43,68	7,27	17,25	255	0,00136
19/12/2000	19:20	1,9	43,72	7,38	4,44	270	0,00125
20/12/2000	05:45	3	43,78	7,39	7,45	333	0,02258
17/01/2001	15:40	2,6	43,77	7,36	8,68	310	0,00421
06/02/2001	22:28	4,1	44,08	8,59	136,00	73	0,01724

Chapitre 5 : Détermination du séisme de référence pour Monaco

date	heure	M	lat	Long	D epi	az	V en cm/s
25/02/2001	18:34	4,5	43,5	7,48	25,33	165	0,05048
14/03/2001	14:03	3,8	43,57	8,06	73,03	103	0,01325
13/04/2001	02:35	3,2	45,08	6,87	162,98	338	0,00016
03/06/2001	00:03	3,8	44,08	8,64	141,32	74	0,00361
01/07/2001	19:37	3,4	44,56	6,98	105,35	332	0,00095
17/07/2001	15:07	5,2	41,84	10,9	443,35	118	0,00079
18/07/2001	22:47	4,1	44,83	8,28	156,00	38	0,00750
22/09/2001	19:27	4,2	37,44	5,32	735,68	198	0,00037
01/10/2001	06:37	4,3	46,59	10,6	474,26	48	0,00016
16/10/2001	04:12	3,1	45,14	6,4	194,24	324	0,00019
23/10/2001	13:24	2,8	43,9	7,97	64,29	72	0,00021
26/11/2001	00:57	4,9	43,89	11,4	442,58	88	0,00041
26/01/2002	07:37	3	44,37	7,31	73,24	350	0,00143
30/01/2002	22:00	2,7	43,86	7,7	34,78	63	0,00139
02/02/2002	14:26	3,2	43,84	7,76	40,06	71	0,00315
02/02/2002	17:38	3,3	45,07	6,36	190,69	322	0,00031
06/05/2002	06:42	3	44,48	7,29	85,66	350	0,00090
17/06/2002	22:26	3,3	44,32	7,42	66,66	0	0,00142
18/06/2002	22:24	4,4	44,5	10,8	381,06	77	0,00030
19/06/2002	22:11	4,4	44,56	10,6	360,05	75	0,00027
27/07/2002	15:23	2,9	43,84	7,44	13,52	9	0,00938
13/11/2002	10:48	4,4	45,64	10,1	361,77	54	0,00071
22/02/2003	20:42	5,4	48,37	6,64	523,83	350	0,00220
09/04/2003	14:09	3,2	44,52	8,14	119,58	42	0,00071
11/04/2003	09:27	4,9	44,81	8,97	210,52	55	0,04146
21/05/2003	18:53	6,8	37,58	3,65	800,48	212	0,01369
21/05/2003	18:59	5,2	37,98	3,57	767,88	214	0,00250
21/05/2003	23:33	4,5	37,71	3,6	791,17	212	0,00068
22/05/2003	14:05	4,7	37,96	4,03	742,54	210	0,00117
23/05/2003	00:17	5,4	37,81	3,77	771,73	212	0,00046
25/05/2003	23:09	3,6	45,15	6,51	188,31	328	0,00070
27/05/2003	17:19	5,4	37,67	3,65	791,98	212	0,00197
28/05/2003	07:07	4,5	37,69	3,44	802,70	213	0,00061
29/05/2003	02:23	4,6	37,74	3,46	796,84	214	0,00085
10/06/2003	22:59	3,4	44,77	7,71	121,02	15	0,00119
11/06/2003	05:55	tir	/	/	/	/	0,01816
14/09/2003	22:37	2,9	44,23	7,49	57,19	8	0,00210
24/11/2004	23:00	5,3	44,55	11,2	427,79	78	0,05699

Tableau 14 : Moyenne de la vitesse sur les voies horizontales en cm/s mesurée par la station MONA pour l'ensemble des séismes locaux et régionaux (<800 km) enregistrés entre 1997 et 2004. Localisation bulletin RENASS + LDG.

Nous proposons d'appliquer 3 lois d'atténuation : Petrovski (1986), Sabetta-Pugliese (1987) et Theodulidis-Papazachos (1992) afin de déterminer pour laquelle les vitesses calculées se rapprochent le plus des vitesses mesurées en Principauté. L'objectif est d'évaluer s'il est possible d'adapter cette loi au contexte monégasque.

Pour appliquer les lois d'atténuations principales pour la vitesse nous avons sélectionné les séismes de magnitude supérieure à 3.8 et de distance épacentrale inférieure à 200 kilomètres (Tableau 15).

date	heure	M	Distance épicerentre en km	Azimu t en °	V en cm/s	Petrovsky 1986 cm/s	rapport P	Sabetta- Pugliese 1987 cm/s	rapport SP	Theodulis 1992 cm/s	rap T
14/03/2001	14:03	3,8	73,03	103	0,01325	0,30	22,61	0,14	10,80	0,06	4,54
03/06/2001	00:03	3,8	141,32	74	0,00361	0,14	38,96	0,07	20,55	0,02	6,32
08/11/1997	01:56	4	76,59	66	0,00683	0,34	50,23	0,17	24,65	0,07	10,91
11/04/1998	11:05	4	97,17	354	0,00152	0,26	172,61	0,13	87,16	0,05	34,62
06/02/2001	22:28	4,1	136,00	73	0,01724	0,19	11,28	0,11	6,11	0,04	2,13
18/07/2001	22:47	4,1	156,00	38	0,00750	0,16	21,95	0,09	12,24	0,03	3,98
24/02/1997	12:10	4,5	116,66	91	0,02477	0,34	13,70	0,19	7,54	0,08	3,29
25/02/2001	18:34	4,5	25,33	165	0,05048	1,55	30,79	0,85	16,87	0,64	12,75
31/10/1997	04:23	4,7	108,82	302	0,00361	0,45	123,75	0,25	68,73	0,12	33,41
moy							53,99		28,29		12,44

Tableau 15 : Séismes de magnitude supérieure à 3,8 et de distance inférieure à 200 km enregistrés à la station MONA (Rocher de Monaco) avec leur distance et leur azimuth par rapport aux épicentres, la vitesse atteinte pour la moyenne des voies horizontales, les vitesses calculées pour les lois d'atténuation Petrovski (1986), Sabetta-Pugliese (1987) et Theodulidis-Papazachos (1992) ainsi que pour chacune de ces lois le rapport entre vitesse calculée et vitesse mesurée.

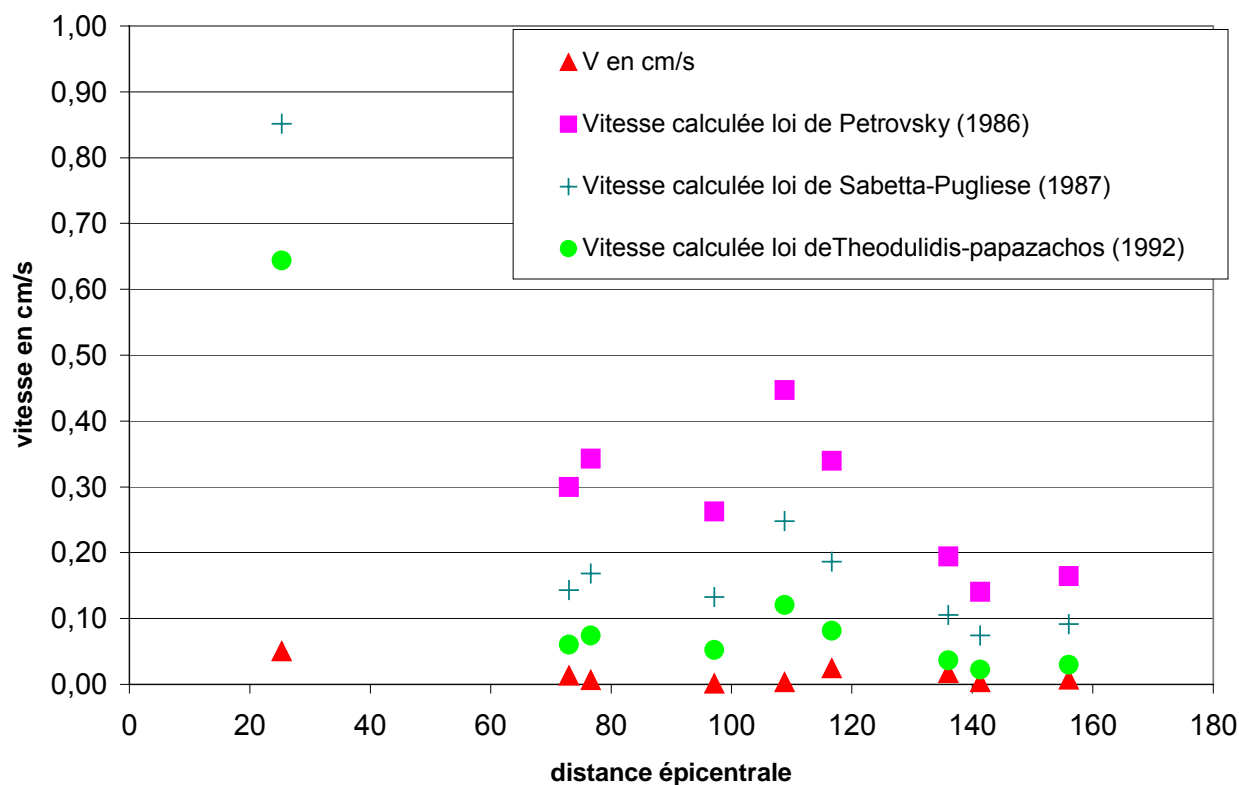


Figure 68 : Vitesses mesurées à la station MONA (Rocher de Monaco) et vitesses calculées pour les lois d'atténuation de Petrovski (1986), Sabetta-Pugliese (1987) et Theodulidis-Papazachos (1992) des séismes de magnitude supérieure à 3,8 et de distance inférieure à 200 km.

Pour avoir suffisamment de données nous retiendrons donc 9 événements dont certains ont des magnitudes inférieures aux limites de validité des lois d'atténuation (Tableau 7). C'est le problème caractéristique d'une zone de sismicité moyenne où peu de séismes sont exploitables pour déterminer précisément une loi d'application propre à la zone. L'objectif n'est pas d'appliquer une loi particulière de la littérature mais de définir à partir de la banque de données sismologiques monégasques une loi pour Monaco. Afin d'englober le maximum

d'événements nous avons pris des limites aussi larges que possible à savoir une magnitude supérieure à 3.7 et une distance de l'épicentre inférieure à 200 kilomètres par rapport à Monaco.

Les vitesses ont été calculées pour chacune des lois et nous avons fait leur rapport avec la vitesse mesurée. La plus faible moyenne de ces rapports détermine la loi de référence la plus adaptée au contexte monégasque. Il s'agit ici de la loi de Theodulidis-Papazachos (1992) qui présente toutefois un rapport moyen de 12 entre vitesses calculées et vitesses mesurées. Comme déjà observé pour les accélérations les vitesses calculées par les lois d'atténuation classiques sont surestimées par rapport aux vitesses mesurées.

Les données mesurées ne sont toutefois pas assez nombreuses et nous pensons qu'il serait hasardeux de proposer une adaptation de la loi de Theodulidis-Papazachos (1992) aux caractéristiques monégasques. Il est nécessaire de poursuivre les mesures pour alimenter la base de données sismologiques de la Principauté. Dans l'avenir une base de données plus fournie permettra la définition d'une loi d'atténuation spécifique à Monaco. Cette dernière estimera au mieux les vitesses qui pourraient être atteintes sur le territoire de la Principauté en fonction de la magnitude et de la distance épicentrale de séismes hypothétiques.

En conclusion l'application des différentes lois d'atténuation sur Monaco a permis de :

- déterminer par le calcul de leurs accélérations maximales, les principaux séismes historiques majeurs pour Monaco à partir des données historiques issues de la base de données Sisfrance 2003 ;
- d'établir un classement des accélérations maximales calculées pour les principaux séismes hypothétiques, historiques et instrumentaux ;
- de mettre en évidence une tendance à la surestimation des vitesses et accélérations calculées par les lois d'atténuation par rapport à celles mesurées.

2 Prise en compte des zones sismogènes

Les zones sismogènes sont les zones géographiques où la sismicité se concentre et qui sont susceptibles d'accueillir le séisme de référence à prendre en compte dans une région.

Le chapitre précédent s'est intéressé aux cas particuliers des séismes principaux et de leurs importances relatives, ici la détermination des zones sismogènes apportera, en complémentarité, une vision plus globale de la sismicité.

L'objectif est de déterminer, pour chaque base de données disponible, des zones sismogènes. Ces dernières seront compilées afin d'extraire les zones, actuellement les plus actives, susceptibles d'accueillir le séisme de référence.

Les données exploitées sont les séismes historiques et les séismes instrumentaux. Ces derniers regroupent la base de données de la littérature des séismes supérieurs à 3.7 dans notre zone d'étude mais aussi la base de données des séismes enregistrés sur Monaco.

2.1. Apport de la sismicité historique

L'objectif est de déterminer d'éventuelles zones où les principaux séismes historiques sont regroupés (Figure 69).

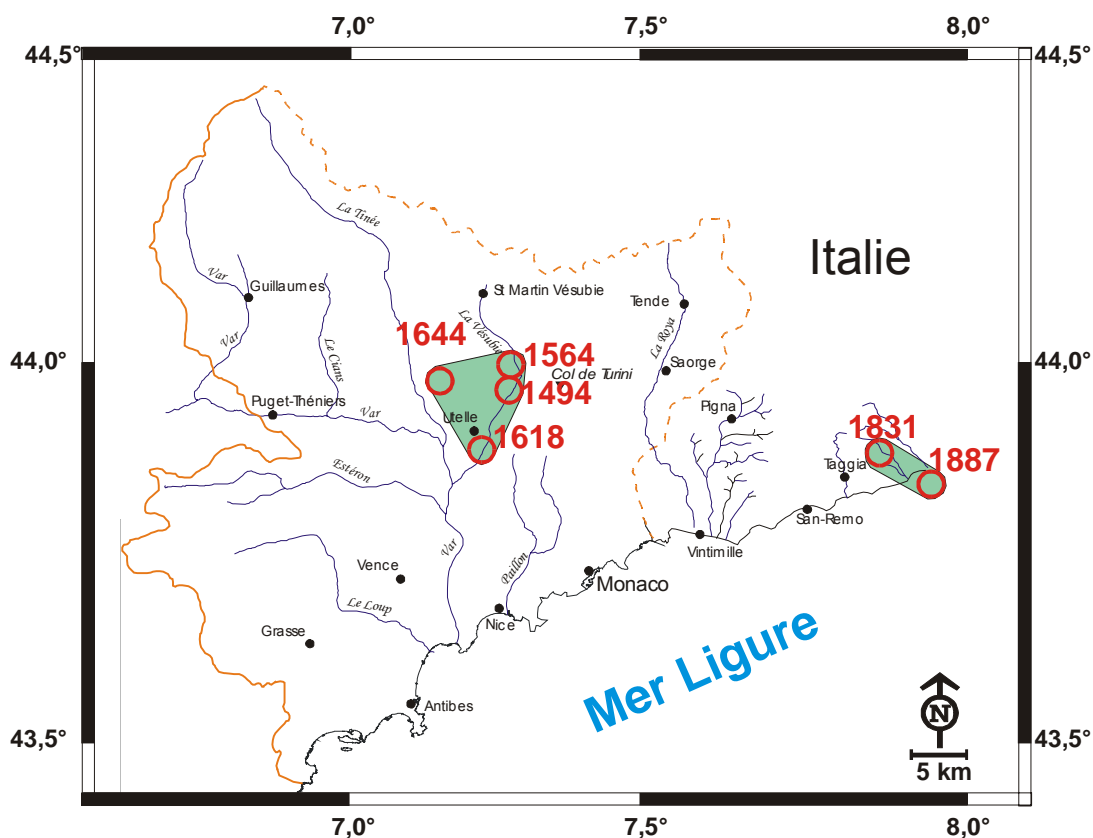


Figure 69 : Détermination des zones sismogènes à partir des séismes historiques extraits de la base de données SISFRANCE 2003.

Seuls les séismes principaux sont représentés mais deux zones sont identifiables :

- la zone de « proximité-terre » située entre 10 à 30 km dans l'arrière pays de Monaco. Elle est le berceau des séismes majeurs de 1494, 1564, 1618 et 1644 ;
- la zone « intermédiaire » située au delà de 60 km à l'est de Monaco dans la bordure septentrionale du Golfe de Gênes. Plusieurs séismes majeurs dont celui de 1887 y ont eu lieu.

Rappelons que l'indice de fiabilité des coordonnées de l'épicentre est incertain pour celui de 1644 et présumé pour les autres. Les épicentres ont été localisés en fonction de la répartition des dégâts mais sans tenir compte des effets de site, nous pensons toutefois que la prise en compte de ces événements dans une zone géographique assez large est acceptable.

Ces zones ont été déterminées en fonction des dégâts humains et matériels retrouvés dans les archives. Si des séismes en mer d'intensité moindre que celui de 1887 n'ont fait aucune victime à terre ils ont disparu de la mémoire. Il pourrait donc exister une zone en mer intéressant Monaco et qui ne peut être mise en évidence par la sismicité historique.

2.2. Apport de la sismicité instrumentale

Comme pour la sismicité historique l'objectif est d'analyser la répartition géographique de la sismicité instrumentale afin de définir des zones sismogènes.

Les zones sismogènes seront définies là où la concentration des événements est la plus importante.

Les données utilisées pour l'apport de la sismicité instrumentale sont :

- la base de données du BCSF des séismes de ces 50 dernières années pour notre zone d'étude mise à jour par les dernières publications (Nicolas *et al.*, 1998 ; Larroque *et al.*, 2001),
- la base de données monégasque qui concerne les séismes de ces 7 dernières années qui ont été les mieux enregistrés sur Monaco.

2.2.1. Sismicité instrumentale régionale

Les données exploitées sont les séismes de magnitude supérieure à 3.5 de 1963 jusqu'en juillet 2005.

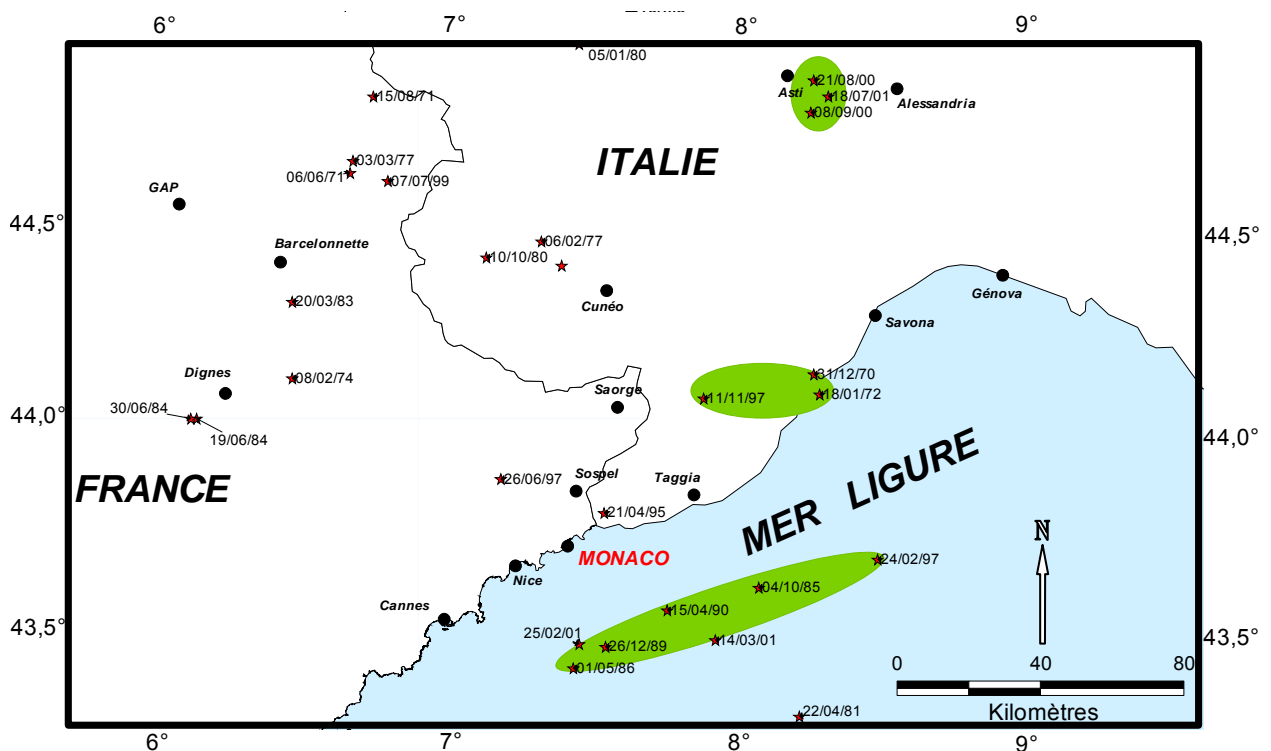


Figure 70 : Détermination des zones sismogènes pour les séismes de magnitude > 3.5 de 1963 jusqu'en juillet 2005 à la jonction des Alpes du sud et du bassin Ligurie – latitudes 43°43' et 45°N - et - longitudes 6 à 8.5°E.

Deux zones sismogènes intéressant Monaco sont mises en évidence :

- la zone Ligure, où plusieurs séismes se concentrent sur une linéation N40° qui passe à 30 kilomètres au sud de Monaco ;
- la zone située à une soixantaine de km au NE de Monaco.

Notons toutefois la zone entre Asti et Alessandria située à plus de 130 km de la Principauté et qui, dans le cadre de la détermination du séisme de référence à prendre en compte à Monaco, ne sera pas retenue comme une des zones sismogènes majeures intéressant Monaco.

2.2.2. Sismicité instrumentale enregistrée sur le territoire monégasque.

La répartition de sismicité enregistrée à Monaco permet de définir également plusieurs zones sismogènes en prenant en compte la notion d'intensité sur Monaco (Figure 71). Seuls les séismes qui ont une vitesse sur le Rocher à Monaco supérieure à $0,25 \cdot 10^{-3}$ cm/s sont retenus pour l'identification de ces zones sismogènes.

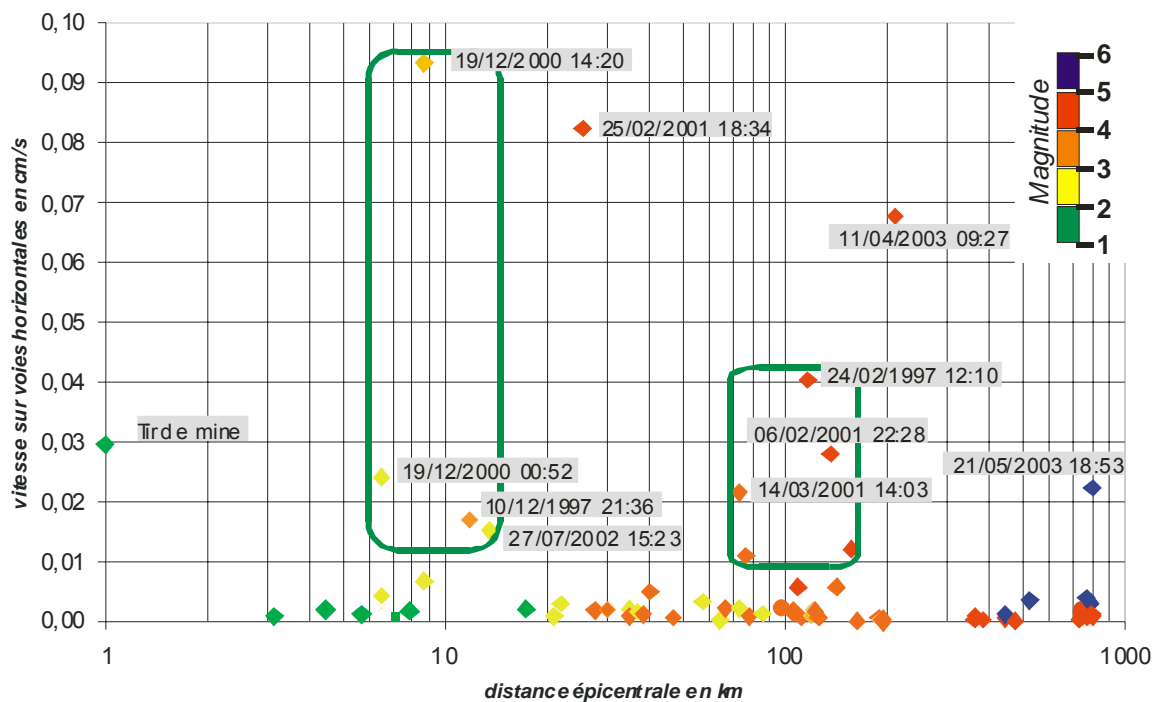


Figure 71 : Sismicité enregistrée sur Monaco de 1997 à 2005 avec la répartition du couple « vitesse sur Monaco – magnitude » en fonction de la distance épacentrale. (vert : $M < 2$; Jaune : $M < 3$; orange : $M < 4$; rouge $M < 5$; bleue $M < 6$)

La représentation des séismes en fonction des vitesses atteintes sur Monaco et de leur distances épacentrales permet de distinguer :

- un groupe de séismes entre 5 et 15 km avec notamment le choc principal de la crise sismique de Blausasc (19 décembre 2000) ;
- un groupe de séismes entre 70 et 150 km dont notamment deux situés à l'est de Monaco en mer ligure sur la linéation N40° parallèle à l'axe du bassin.

La sismicité instrumentale monégasque des années 1997-2004 permet d'identifier plusieurs amas de séismes, ceux de la région proche de Monaco (Figure 71) et ceux plus lointains qui ont présenté par leurs caractéristiques des effets notables sur Monaco. Citons notamment l'essaim de séisme autour du lac de Garde mais aussi la secousse principale et ses répliques du séisme de Boumerdès (Figure 19).

2.3. Conclusion sur les zones sismogènes

Plusieurs zones sismogènes ont été mises en évidence par la sismicité historique et instrumentale. En terme de distance nous pouvons distinguer deux zones sismogènes :

- a) la zone de « proximité » (inférieure à 30 km) qui comprend :
 - au nord la crise sismique de Blausasc (décembre 2000) et le petit séisme de Peille (Novembre 1999), et tous les séismes historiques de l'arrière pays (1494, 1564, 1618 et 1644),
 - à l'est le séisme de Vintimille du 21/04/95 (le plus ressenti sur Monaco lors de ces 10 dernières années),
 - au sud, les séismes de la zone Ligure proche avec les séismes de 1989, 1990 et celui du 25 février 2001.

- b) La zone des 70 km qui comprend le séisme situé à l'Est d'Alessandria du 11/04/03 et surtout ceux de 1963 et janvier 1980 et le plus important des séismes historiques celui du 23 février 1887.

Les vitesses les plus élevées concernent la zone de proximité. La plupart des séismes historiques, excepté celui de 1887, se situeraient également dans cette zone. Le plus grand nombre de séismes se concentre par contre dans la zone intermédiaire notamment le séisme Ligure du 23 février 1887.

En conclusion les zones sismogènes qui seraient susceptibles d'accueillir le séisme de référence sont pour nous :

- la zone en mer ligure à une trentaine de kilomètres au large de Monaco qui comprend 3 séismes principaux en 1989, 1990 et 2001,
- une zone située au nord de Monaco qui a accueilli 4 des principaux séismes historiques même si leurs magnitudes et leurs effets sur la Principauté restent discutables,
- une zone plus lointaine située à une soixantaine de km au nord-est de Monaco sur la côte Ligure qui comprend le séisme de 1887 mais aussi de nombreux séismes récents.

3. Synthèse sur le séisme de référence à prendre en compte à Monaco

Monaco, comme Nice est une cité du littoral Méditerranéen soumise à un aléa sismique régional moyen. En 1986, la Principauté était classée en zone II dans le nouveau zonage sismique de la France (Despeyroux et Godefroy, 1986). Le séisme d'intérêt régional, contre lequel on entend se protéger, avait les caractéristiques suivantes : 6.5 pour la magnitude, 70 km pour la distance épacentrale et 270 ans pour la période de retour. En 1992, l'étude du microzonage s'était limitée à souligner que les séismes les plus importants qui pouvaient affecter la Principauté auraient leurs épacentres dans le golfe de Gènes, en Ligurie, en moyenne Roya et, dans une moindre mesure, dans la région d'Entracque-Cunéo (CETE, 1992). Suite à cette étude, le séisme de référence défini avec une magnitude de 6.5, avait en vertu du principe de précaution sa distance de 70 km ramenée à 30 km. En 1996, dans une étude dont l'objectif était de mettre en place pour la Principauté une réglementation parasismique qui tienne compte du microzonage, le séisme retenu comme pouvant être le plus « nocif » pour Monaco se situait en mer à une trentaine de kilomètres de la Principauté avec une magnitude 6.5 (CETE, 1996). En 2002, une nouvelle étude intitulée « Définition de la méthode d'obtention des spectres en surface et réévaluation du séisme de référence » précisait le séisme de référence à une distance de 28 km de la Principauté et une magnitude de 6.3 (JPM, 2002). L'argumentation reposait sur l'existence d'un accident reliant l'épicentre du séisme Ligure de 1887 avec celui du 26 décembre 1989 et la magnitude était prise égale à 6.3, par référence à l'estimation de celle de 1887. Rappelons que les coordonnées de l'épicentre du séisme de 1887 sont incertaines (SISFRANCE, 2003) et que cette « faille » représente en fait une zone de faiblesse mal déterminée et localisée approximativement en pied de talus (Comm. orale Bethoux, 2005). Toutefois les caractéristiques du séisme de référence, au niveau de la réglementation parasismique monégasque, n'ont pas été modifiées et sont toujours de 6.5 à 30 km.

L'objectif était de déterminer à partir du résultat argumenté des diverses investigations les caractéristiques du séisme de référence (magnitude et distance épacentrale) qui sont le plus pénalisantes pour la Principauté.

Les séismes hypothétiques que nous allons proposer sont déterminés à la fois par l'analyse de la sismicité instrumentale et historique (application des lois d'atténuation et détermination des zones sismogènes) mais aussi par les résultats de l'analyse géomatique compilés avec la néotectonique de la région.

La sismicité historique et instrumentale ne représente qu'une courte période dans l'échelle des temps géologiques (50 ans pour la sismicité instrumentale, 500 ans pour la sismicité historique). Par conséquent, l'existence d'une activité sismique est un critère essentiel mais pas suffisant au vu de ce faible recul dans le temps. De plus les séismes peuvent être rares sur une faille, ils peuvent alors être d'autant plus destructeurs car l'énergie peut s'accumuler et ne se libérer qu'à grand intervalle de temps. Le séisme de référence à prendre en compte à Monaco ne devrait donc pas uniquement tenir compte de la sismicité historique et instrumentale. Il est nécessaire que ces données soient compilées avec des investigations reposant sur d'autres techniques pour améliorer la connaissance des principales failles actives dans notre région.

3.1. Propositions de séismes hypothétiques majeurs

Nous proposons plusieurs séismes hypothétiques dont le plus pénalisant en terme d'accélération pourrait être comparé à l'actuel séisme de référence pris en compte actuellement dans la réglementation parasismique à Monaco qui est un *événement* de magnitude 6.5 dont l'épicentre se situerait à 30 km :

- Le séisme hypothétique de Blausasc : c'est le séisme qui serait engendré par l'activation en une seule fois des 6 km activés durant la crise sismique des 19 et 20 décembre 2000 et qui atteindrait la magnitude 5.5 (Couboulex, 2005).
- Le séisme localisé à l'intersection de la faille de Saorge-Taggia et de l'accident Saorge – Monaco : la faille de Saorge-Taggia est la plus active de toute la région (Hoang Trong *et al.*, 1987 ; Cosani, 1996 ; Madeddu, 1997), un séisme majeur non loin de son extrémité occidentale pourrait remobiliser l'accident de Saorge – Monaco. L'intersection de ces deux linéaments majeurs est située à une trentaine de km de la Principauté. Une magnitude 6 à ce niveau nous paraît tout à fait plausible, étant donné la longueur de cet accident.
- Le séisme localisé au pied du talus continental à une trentaine de kilomètres au large de Monaco : cette zone d'accidents parallèles à la marge a eu une activité sismique « ressentie » assez importante ces dernières années avec trois séismes de magnitude supérieure à 4 (1989, 1990 et 2001). Le séisme Ligure de 1887 pourrait être situé sur ce même accident majeur, mais au large de Taggia. Un séisme de magnitude 6 à 30 km au sud de Monaco reste donc tout à fait envisageable.
- Le séisme sur l'accident Col St Michel- Sospel, situé à une vingtaine de kilomètres de la Principauté, l'estimation d'une magnitude potentielle reste délicate du fait de l'actuelle asismicité sur ou aux alentours de cet accident.
- Un séisme localisé à l'intersection des accidents Paillon-Monaco et Peille-Laghet. Là encore l'estimation d'une magnitude potentielle est difficile.

La plupart de ces séismes hypothétiques se localisent à l'intersection des grands couloirs linéamentaires ou à la croisée des principaux accidents à l'image du séisme Ligure de 1887 situé à la croisée de la continuité marine de l'accident de Saorge-Taggia et de la linéation N40°E parallèle à l'axe du bassin ligure.

3.2. Discussion sur ces séismes hypothétiques et détermination du séisme de référence

Le séisme hypothétique de Blausasc serait le séisme le plus proche de Monaco et qui présenterait d'après le calcul des lois d'atténuation l'accélération maximale la plus importante de tous les séismes hypothétiques au niveau de Monaco. Cependant comme nous l'avons démontré auparavant, d'une part, les calculs des vitesses et des accélérations par les lois classiques semblent surévalués dans le contexte monégasque, et d'autre part, les dégâts engendrés sur le bâti le sont par le maintien de cette accélération dans la durée, ce qui n'est pas forcément le cas pour les séismes en champ proche (8 km dans le cas du séisme hypothétique de Blausasc). De plus, l'analyse de la sismicité historique en France (Lambert *et al.*, 1996) montre qu'un séisme de magnitude 5.5 présente des dégâts moindres que ceux infligés en 1887 sur la Côte d'Azur par le séisme Ligure de magnitude 6.4 (Ferrari, 1991) et situé à plus de 50 km de Menton et à 65 km de Monaco. L'intensité sur Monaco de ce séisme hypothétique de Blausasc serait donc sans commune mesure avec un séisme de magnitude 6.5 à 30 km.

Concernant l'accident N100°E Col Saint Michel - Sospel situé à 16 km de Monaco, malgré tous les arguments géomatiques, morphologiques, structuraux et historiques qui sembleraient converger vers sa potentielle activité, nous avons choisi du fait de l'actuel déficit d'activité sismique à ses abords, de ne pas en tenir compte dans le choix des caractéristiques du séisme de référence. Toutefois nous insistons sur la nécessaire attention qu'il faudra dans l'avenir lui porter. Sur cet accident un séisme, même de faible magnitude, qui présenterait un plan de faille N100° serait suffisant à nos yeux pour en faire l'accident majeur de la région. Le même raisonnement peut être appliqué à l'accident Paillon-Monaco en rappelant qu'il est moins bien marqué au niveau de l'analyse géomatique et a donc pour nous une activité moins récente. En régime intraplaque à déformation lente, un séisme a une période de récurrence très longue. De plus l'inactivité d'une faille à l'échelle d'observation de la sismicité instrumentale n'est pas un argument suffisant.

Dans la zone des 70 km « zone intermédiaire », le séisme de 1887 a occasionné des dégâts matériels à Monaco qui sont développés dans le **chapitre 6**. Le séisme de 1963, de magnitude 6 et situé à moins de 100 km, n'a eu aucune incidence matérielle en Principauté. Tous ces séismes resteraient au niveau de leurs effets sur le territoire monégasque en deçà des dégâts qu'engendrerait un séisme de magnitude 6.5 et situé à une distance épacentrale de 30 km. Il n'en reste pas moins que si leur magnitude était plus importante, ils occasionneraient de sérieux dégâts.

Au-delà de cette zone, certains séismes de forte magnitude supérieure à celle du séisme d'Alger situés à plus de 800 km pourraient générer des dégâts sur Monaco. Les ondes T du séisme d'Alger de magnitude 6.8 et ses principales répliques ont été particulièrement ressenties sur Monaco. Les ondes T véhiculent à travers le canal SOFAR de l'énergie des ondes P non atténuées même à grande distance. En arrivant sur un talus continental ces ondes se diffractent en se convertissant en ondes de volume P et S. Suivant l'orientation du talus par rapport à l'onde T incidente, l'énergie convertie peut être importante (Cansi et Bethoux, 1980). Nous exploiterons dans le chapitre 6 les enregistrements de ce séisme en différents points de la Principauté. Ce séisme a de plus engendré un micro-tsunami sur Monaco qui sera développé également dans le chapitre 6.

Nous proposons, au vu de ces principaux accidents, de ne pas changer les paramètres du séisme de référence, mais en précisant toutefois qu'il existe des accidents plurikilométriques à surveiller comme par exemple l'accident col Saint Michel – Sospel.

En conclusion nous confirmons le séisme de magnitude 6.5 à 30 km, sans toutefois préciser sa localisation (Nord, Est ou Sud), comme étant le séisme de référence qui doit toujours être pris en compte pour l'application de la réglementation parasismique en Principauté.

CHAPITRE 6 : ALEA LOCAL

1. Introduction - objectifs

L'aléa régional précisé, il est important pour connaître l'aléa sismique de la Principauté d'étudier l'agressivité de cet événement qui dépend du contexte topographique, géologique et géotechnique du site.

Le gouvernement de Monaco a fait réaliser dès 1991 un microzonage (traduction cartographique de l'aléa local) sur la totalité de son territoire (CETE, 1992) pour pouvoir améliorer l'application de sa réglementation parasismique. Cependant, la campagne de microzonage de 1991 n'a duré que six mois et le nombre d'événements exploitables était en général trop faible pour conclure de façon absolue (Duval, 1994).

Des stations permanentes ont depuis été installées dans les sites les plus caractéristiques et de nombreux séismes ont été enregistrés. De plus les archives du Palais princiers concernant le séisme du 1887 ont pu être exploitées.

L'objectif de ce chapitre est d'améliorer la connaissance des caractéristiques du mouvement du sol dans les différents quartiers de Monaco lors d'un séisme. Pour l'atteindre nous proposons :

- de synthétiser l'état de la connaissance avec les principaux résultats du microzonage ;
- de traiter l'ensemble des séismes enregistrés depuis 1997 et préciser les résultats du microzonage ;
- d'exploiter les archives du Palais concernant la répartition des dégâts sur le bâti monégasque lors du séisme Ligure de 1887 et définir son intensité macrosismique atteinte en Principauté.

2. Effet de site – définition et méthodes d'étude

2.1. Pourquoi le qualifier

Les déformations lentes de la croûte terrestre engendrées par la tectonique de plaques créent des accumulations de contraintes. Lorsque la résistance des roches est atteinte, il y a rupture et glissement ce qui entraîne une libération considérable d'énergie au voisinage de la source. Cette énergie se dissipe d'une part, sous forme de fracturations, de déformations permanentes et d'échauffement au voisinage de la source et d'autre part, sous forme d'ondes sismiques qui en fonction de leur contenu fréquentiel peuvent provoquer des dégâts aux structures urbaines. L'énergie sismique en un point donné de la surface terrestre dépend de l'énergie émise à la source et des conditions de propagation entre la source et ce point (Aki et Richards, 1980). Du fait du comportement physique des ondes dans le milieu, les dégâts aux constructions décroissent habituellement lorsque l'on s'éloigne du foyer.

Toutefois dans de nombreux cas, il existe des zones où les dégâts sont amplifiés du fait de la géologie locale. Le cas le plus typique étant celui du séisme de Michoacan au Mexique en 1985 de magnitude 6.9 où les destructions les plus importantes ont été déplorées dans le bassin de Mexico situé à près de 350 km de l'épicentre. Cet ancien lac asséché a amplifié considérablement le signal avec une accélération maximale 60 fois plus élevée que celle enregistrée sur le rocher (Singh *et al.*, 1988). Lors du séisme de Northridge le 17 janvier 1994, les amplifications des accélérations enregistrées dans le bassin de Los Angeles ont atteint plus de 7 fois la valeur référence au rocher (USGS, 1996). Plus récemment ce phénomène a été également observé d'une manière moins spectaculaire lors du séisme d'Annecy de 1996. La ville de Rumilly, située à 15 kilomètres de l'épicentre, a présenté des dégâts importants (Dominique et Blès, 1996) alors que les villages les plus proches n'ont pas été touchés (Le Brun, 1997).

L'onde incidente qui arrive sur un site peut donc être transformée, atténuée ou amplifiée par la nature géométrique et rhéologique de ce dernier : c'est l'effet de site. Une géométrie avec des sols meubles qui surmontent des formations géologiques plus rigides peut conduire à des phénomènes de résonance. De plus le contraste d'impédance entre la couche superficielle et le substratum rocheux peut conduire à un piégeage des ondes.

Les effets de site ne dépendent pas uniquement des milieux alluvionnaires ou des remplissages anthropiques, les reliefs topographiques (crêtes, falaises ...) peuvent aussi amplifier le signal de façon très importante. Les villages perchés ont subi d'importantes amplifications avec de sérieux dégâts comme lors du séisme Ligure de 1887 où les villages de Bussana-Vecchia et de Baiardo situés sur des promontoires rocheux ont été sévèrement touchés. Ces observations ont également été faites pour le séisme de Lambesc en 1909 (Levret *et al.*, 1986), celui d'Irpina en 1960 (Bard *et al.*, 1984), le séisme de Frioul de 1976 (Brambati *et al.*, 1980) et pour le séisme de Northridge en 1994 (Aschford et Sitar, 1994).

Si de plus les fréquences amplifiées correspondent aux fréquences de résonance des structures bâties, alors ces dernières seront sujettes à destruction même si l'épicentre est relativement éloigné. Le séisme de Caracas en 1967 de magnitude 6.4 a infligé de fortes destructions aux immeubles de plus de 14 étages situés à 65 km de l'épicentre (Seed *et al.*, 1972). Les périodes d'amplification du séisme par la couche de sédiments correspondaient à la période propre des structures les plus hautes. Lors du séisme de Mexico en 1985 ce sont les immeubles de 5 à 20 étages qui ont été endommagés (Singh *et al.*, 1988). De plus la durée du mouvement est un paramètre important dans la destruction des bâtiments.

Diverses raisons peuvent donc expliquer des dommages éloignés de la zone épicentrale ou inégalement répartis : les différents types de constructions, les effets de déformation des sols, la liquéfaction et les amplifications locales du site.

2.2. Comment le qualifier

Le mouvement du sol dépend de :

- la fonction source décrite par plusieurs paramètres géométriques (taille, direction, pendage) et sismologique (énergie, direction du glissement, vitesse de rupture) ;

- la fonction de propagation qui tient compte de la rhéologie du milieu (vitesse, densité, loi d'atténuation) ;
- la fonction du site, habituellement appelée « effets de site » et décrite précédemment dans divers exemples.

Toutes les méthodes dont le but est de connaître les caractéristiques du mouvement du sol doivent tenir compte de chacune de ces fonctions.

Le mouvement résultant enregistré est le sismogramme en temps qui est la convolution de plusieurs fonctions (source, propagation, site et réponse instrumentale). Le passage dans le domaine fréquentiel se fait par une transformation de Fourier du sismogramme.

Certaines méthodes, pour connaître les caractéristiques du mouvement du sol, exploitent les sismogrammes, d'autres les enregistrements du bruit de fond et enfin certaines sont issues du calcul numérique. Nous présentons ici les différentes méthodes d'analyse qui ont été utilisées dans le microzonage de la Principauté et/ou dans cette étude.

2.2.1. Méthode de la fonction de transfert ou méthode des rapports spectraux

L'objectif de cette méthode, utilisée pour la première fois par Borchardt et Gibbs en 1970, est de déterminer la fonction de transfert d'un site suspecté d'amplifications en calculant le rapport spectral d'enregistrements de séismes entre une station située sur ce site et une autre de référence située près de ce même site mais non sujette à la perturbation due à la structure étudiée.

Plusieurs hypothèses doivent être faites :

- la distance source - station doit être largement supérieure à la distance entre la station de référence et la station étudiée, supérieure à 10 (Field et Jacob, 1995), ainsi la fonction de propagation est la même pour les deux stations,
- la fonction source est la même pour les deux stations,
- la fonction de transfert de l'instrument est éliminée par la déconvolution instrumentale effectuée avant le calcul.

Ainsi la fonction de transfert du site étudié se calcule comme le rapport entre le spectre de Fourier enregistré à la station d'étude et celui à la station de référence.

2.2.2. Méthode H/V séisme ou méthode des fonctions récepteurs

Cette méthode a été introduite par Langtom (1979) pour calculer à partir des ondes P, la structure de vitesse dans la croûte et le manteau supérieur. Par analogie cette méthode a ensuite été utilisée sur les ondes S pour déterminer les effets de site à des échelles plus petites (Lermo et Chavez García, 1993 ; Field et Jacob, 1995b ; Théodulidis *et al.*, 1996). L'effet de site peut être obtenu en divisant les spectres des composantes horizontales par ceux des composantes verticales si l'on considère uniquement la première arrivée de l'onde S.

L'avantage de cette méthode par rapport à la précédente consiste dans le fait qu'elle ne nécessite pas de station de référence. Elle est donc expérimentalement plus aisée car cela permet de s'affranchir du choix toujours difficile d'un bon site de référence.

2.2.3. Méthode H/V bruit

L'utilisation d'enregistrements du bruit de fond pour l'étude des effets de site est fondée sur le principe que le bruit de fond se propage dans le milieu et est amplifié aux fréquences de résonance spécifiques prédominantes du site.

Cette méthode introduite par Nakamura (1989) a été développée en fait par Nogoshi (1971) pour calculer la fonction de transfert d'un site en effectuant pour une seule station le rapport spectral d'enregistrements du bruit de fond sismique entre la composante horizontale et la composante verticale. Cette méthode présente deux avantages majeurs : comme la précédente, l'utilisation d'une seule station suffit et ne nécessite pas l'enregistrement de séismes significatifs dont l'occurrence est toujours aléatoire dans une zone de sismicité moyenne comme la nôtre. En considérant un certain nombre d'hypothèses (Le Brun, 1997 ; Sabouraut, 2000) on obtient le rapport de Nakamura ou HVNR (Horizontal to Vertical Noise Ratio). L'effet de site est ainsi calculé par le rapport entre les spectres de la voie horizontale et celui de la voie verticale. Notons toutefois que le calcul réalisé pour cette méthode est le même que celui réalisé dans la méthode des fonctions récepteurs que l'on peut également nommer HVSR (Horizontal to Vertical spectral Ratio).

HVSR estimé à partir des mouvements forts (non linéarité) ou HVNR issu du bruit de fond donne des résultats identiques aussi bien sur le contenu fréquentiel que sur les amplitudes mais HVNR ou HVSR a une amplitude inférieure à celle des rapports spectraux usuels (Field, 1995, 1995a).

2.2.4. Les études numériques

Les effets de site par voie expérimentale s'accompagnent toujours d'une étude permettant de connaître au mieux les caractéristiques géotechniques du site. Elle vise également la détermination de la fonction de transfert du site qui permet de calculer la modification du signal dans les domaines fréquentiels et temporels. Les études numériques mettent en œuvre des calculs uni, bi ou tri directionnels avec des modèles de sols linéaires ou non linéaires. Elles impliquent une bonne connaissance de la géométrie et des caractéristiques physiques et mécaniques des terrains constituant le site. Ces dernières sont déterminées par les résultats des sondages, les analyses de laboratoire, les études géophysiques et les essais géotechniques qui permettent l'établissement du modèle représentatif du site. Les principaux paramètres recherchés sont la masse volumique, la vitesse des ondes de compression (V_p) et de cisaillement (V_s), le facteur de qualité Q_s et l'épaisseur h de l'interface.

Cependant les méthodes numériques simplifiées permettent, à partir de l'exploitation de quelques paramètres mécaniques et morphologiques schématisant le site, de définir assez rapidement l'effet local. Ces méthodes simplifiées rendent bien compte de la réalité lorsque le site est morphologiquement et géologiquement bien défini.

2.3. Les limites de mesures expérimentales : la non linéarité

Les sources utilisées (microséismes) lors de la partie expérimentale du microzonage développent une énergie nettement inférieure à celle d'un séisme fort. Les fonctions de transfert obtenues, qui n'ont pas recours à l'identification de paramètres géotechniques, sont-elles alors réalistes ? Autrement dit les rapports spectraux effectués sur les mouvements faibles sont-ils représentatifs des effets de site en mouvement forts ?

Il y a eu jusqu'à peu un désaccord entre géotechniciens, pour qui le sol a un comportement non linéaire dans les essais sur échantillons même à faible contrainte, et les sismologues qui pensent que le comportement des sols est pratiquement linéaire jusqu'à 0,3 ou 0,4 g, voire 1 g dans certains cas.

Dans la plupart des microzonages réalisés, la moyenne des rapports spectraux était appliquée aux mouvements forts jusqu'à un niveau d'accélération limite de 0,2 à 0,3g et une distance à la source supérieure à une cinquantaine de kilomètres (Rogers *et al.*, 1984 ; Hays, 1986 ; Aki, 1993).

Depuis des modélisations sur modèle réduit en centrifugeuse ont mis en évidence le passage du comportement linéaire au non linéaire lorsque la sollicitation sismique devient importante (Sabourault, 1999). Aujourd'hui il semblerait qu'il y ait une réconciliation croissante entre les points de vue des sismologues et ceux des ingénieurs sur la réponse non linéaire du sol (Lacave, 2003).

3. Le microzonage de Monaco – CETE 1991-1992

Le microzonage consiste à étudier les effets de site à l'échelle d'une ville en règle générale. Il s'accompagne de la définition des phénomènes induits prévisibles (mouvements de terrain, éboulements, liquéfaction ...). Après un zonage géotechnique les sites sont groupés en parcelle homogène, puis le comportement au séisme de chaque zone est mis en évidence par rapport au comportement du site de référence à ce même séisme.

Nous présentons ici les résultats principaux de la synthèse géotechnique et du microzonage réalisé par le CETE (1991-1992) qui est à la base de la réglementation parasismique actuelle.

3.1. Synthèse géotechnique

En 1987, une synthèse géologique a été réalisée. Son objectif était de disposer d'une synthèse de données géologiques de la Principauté, à partir de nombreuses campagnes de reconnaissances effectuées, destinées à être utilement consulté lors de l'élaboration de chaque projet et de permettre d'ajuster les reconnaissances à entreprendre.

Un modèle géologique a été effectué à partir :

- des données de la structure découlant de cette synthèse géologique,
- de l'exploitation géotechnique du fichier de sondages qui a permis d'affecter à chaque unité géologique des caractéristiques géotechniques moyennes.

Sept zones, réputées de même comportement géotechnique, ont ainsi été identifiées et reportées sur la carte de l'écorché géologique antéquatenaire (Figure 72)

- **ZONE 1** : elle se situe aux confins sud-ouest de la Principauté et est relativement réduite. Il s'agit du versant de l'hôpital Princesse Grace, où le recouvrement d'éboulis est important ; il surmonte des formations Crétacé.
- **ZONE 2** : elle comprend le grand ensemble du terre plein de Fontvieille, énorme accumulation anthropique constituée de remblais argilo-sableux caillouteux qui ont été déposés sur des terrains quaternaires également sablo-argileux.
- **ZONE 3** : le « Rocher » de Monaco, masse compacte de calcaire jurassique représentant la totalité de la troisième zone.
- **ZONE 4** : située à l'ouest du port, elle représente la bande crétacé de l'écaille de Monaco.
- **ZONE 5** : au nord du port, elle comprend toute l'ossature jurassique calcaire de l'unité de Monte Carlo.
- **ZONE 6** : aux confins nord de la Principauté, à substratum crétacé, elle est partiellement recouverte de puissants éboulis et se prolonge par le remblai anthropique du Sporting.
- **ZONE 7** : elle correspond au remblai anthropique du Larvotto à substratum crétacé.

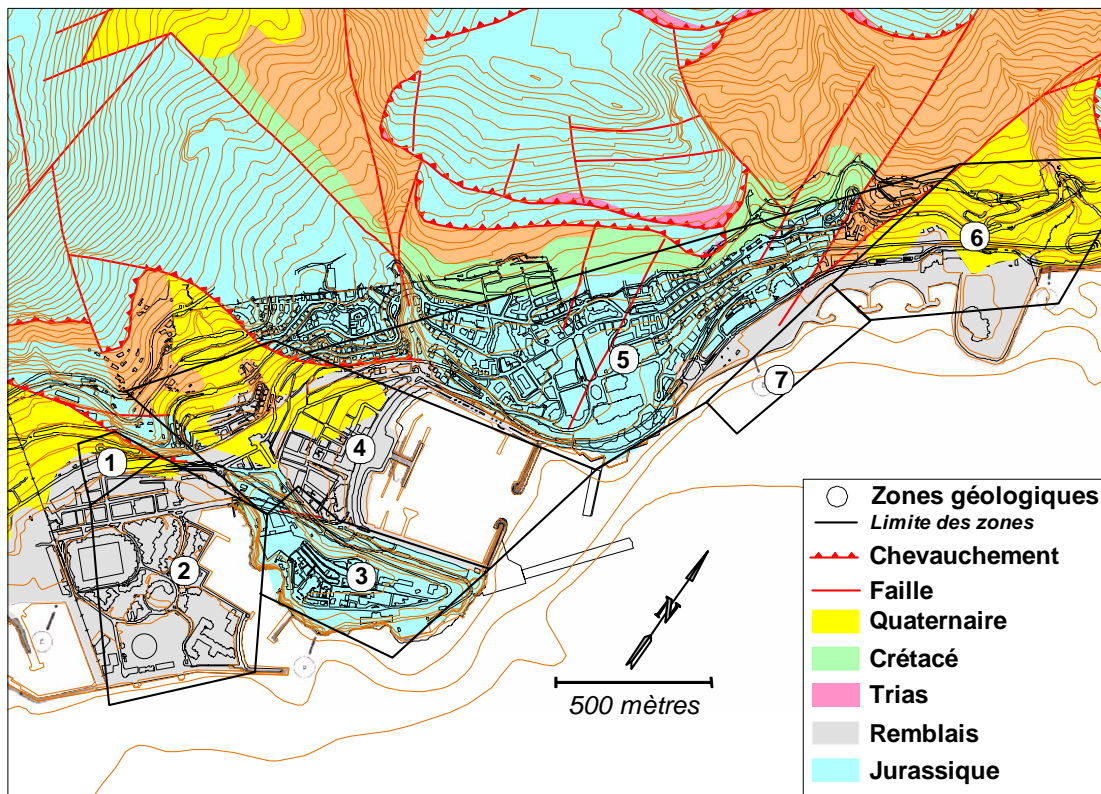


Figure 72 : les grandes zones géologiques de la Principauté d'après la synthèse géologique de Monaco (CETE, 1987, 1992) sur fond de plan topographique.

3.2. Etude 1991 (sismicité et modélisation numérique)

La sismicité a été enregistrée sur 10 sites représentatifs de la Principauté. La station de référence était située sur l'écaille calcaire jurassique de Saint Jean Cap Ferrat éloignée d'une dizaine de kilomètres à l'ouest du réseau de stations sismiques installé en Principauté (Figure 73).

Pendant cette campagne du microzonage la sismicité régionale a été relativement faible. De plus le bruit ambiant important en ville a pollué le signal sismique. Durant cette campagne de 5 mois, seuls 39 événements ont pu être exploités (Duval, 1994) :

- 19 séismes proches ou régionaux,
- 7 télé-séismes,
- 4 tirs de la marine Française effectués à environ 200 km,
- 9 tirs de carrières effectués à plus de 100 km.

Pour les études numériques à Monaco, la synthèse géologique réalisée en 1987 a permis de disposer de nombreuses données, la densité des terrains est assez bien connue et la connaissance des paramètres mécaniques a été améliorée par des cross-holes (détermination de la vitesse des ondes S) et des essais en laboratoire.

Au total 11 zones ont donc été différenciées dans ce microzonage (Figure 74) et les fonctions de transfert de chacune d'entre elles ont été établies en confrontant les résultats de la démarche expérimentale à ceux des modélisations numériques.

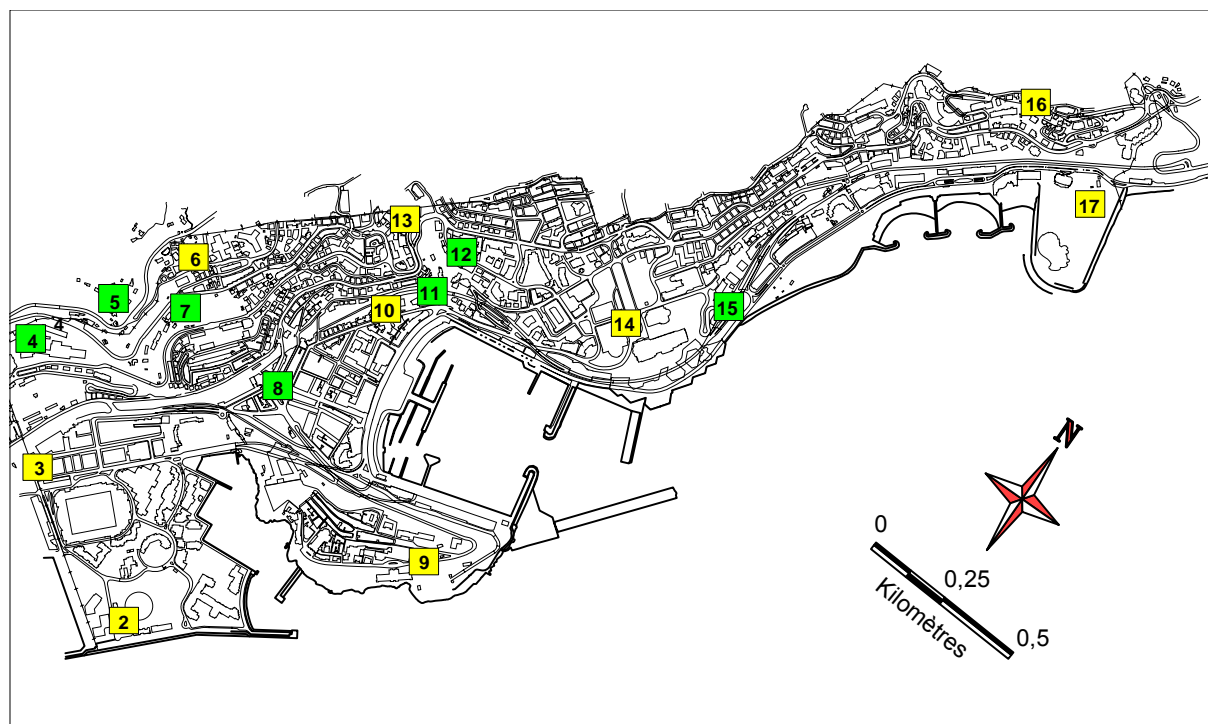
3.3. Etude 1992 (Bruit de fond)

Le bruit de fond a été mesuré en mai 1992 sur 17 sites dont 10 sites déjà exploités lors de l'étude de 1991 et 7 nouveaux sites caractéristiques (Figure 73).

Sur le terre plein de Fontvieille (Site CIR) une série de 8 enregistrements a eu lieu durant la nuit. Toutes les mesures de bruit de fond ont abouti à des spectres moyens par voie et par site (Duval, 1996).

3.4. Les résultats des diverses analyses (expérimentale, sismique et bruit de fond)

Nous présentons sur fond topographique (Figure 73), les emplacements des stations ayant servi à l'étude expérimentale de 1991 et les points de mesure du bruit de fond de la campagne de 1992 (CETE, 1992).



1: FER: station de référence du microzonage située à 10 km au sud-ouest de Monaco

2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
CIR	BOU	CMT	EXO	ANT	PLA	ARM	ROC	MUS	DEV	SUI	MON	CSN	LAR	ROM	SBM

Figure 73 : Points de mesures et noms de code utilisés lors du microzonage (CETE, 1992) en jaune et de la campagne de bruit de fond (CETE, 1992) en vert sur fond de plan topographique DEUC.

Pour le microzonage 12 zones ont été délimitées en fonction de leurs caractéristiques géologiques et géotechniques (Figure 74).

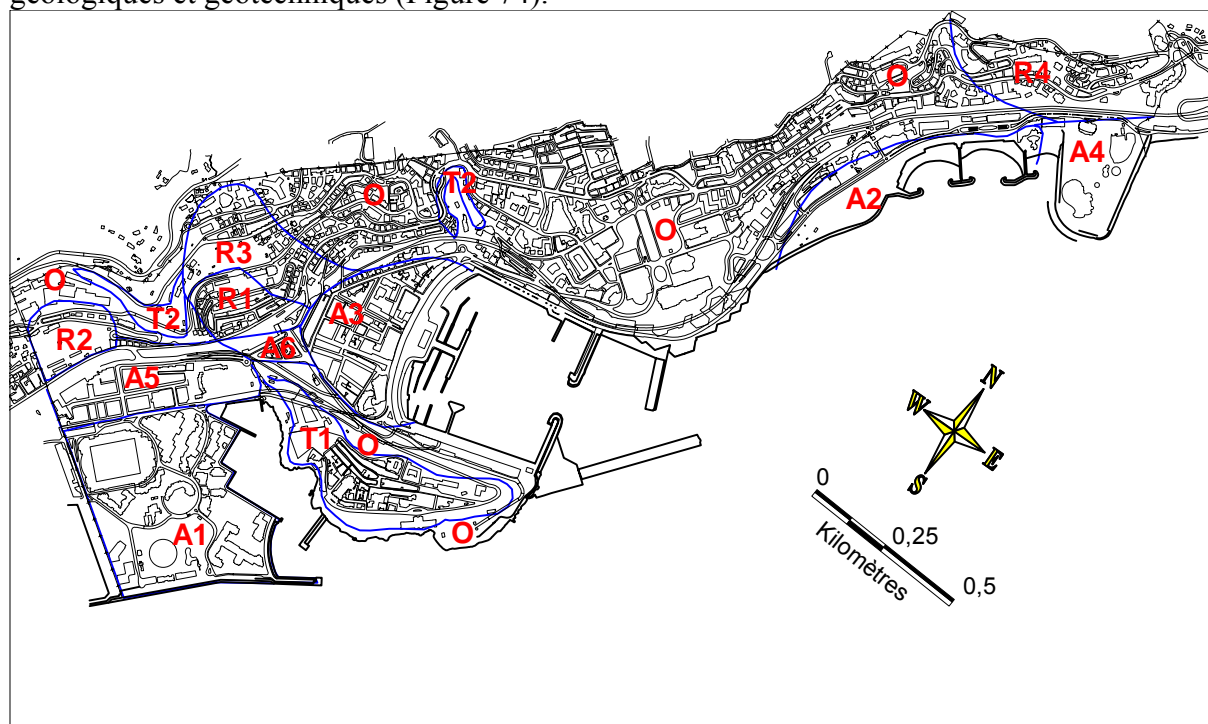


Figure 74 : Les différentes zones de même comportement géotechnique à Monaco (CETE, 1992) sur fond de plan topographique (DEUC, 1994).

Chapitre 6 : Aléa local

Les résultats de ces deux études sont présentés sous forme d'un tableau pour les zones non anthropiques, classés par zone en fonction de leurs caractéristiques géologiques et géotechniques, les principaux résultats des amplifications issues des différentes méthodes (expérimentales, bruit de fond et numériques) y sont résumés (Tableau 16).

La zone « O » a été subdivisée dans notre présentation.

Les zones anthropiques (Fontvieille, Larvotto et Sporting) plus complexes au niveau des effets de site sont détaillées par la suite.

3.4.1. Les zones non anthropiques

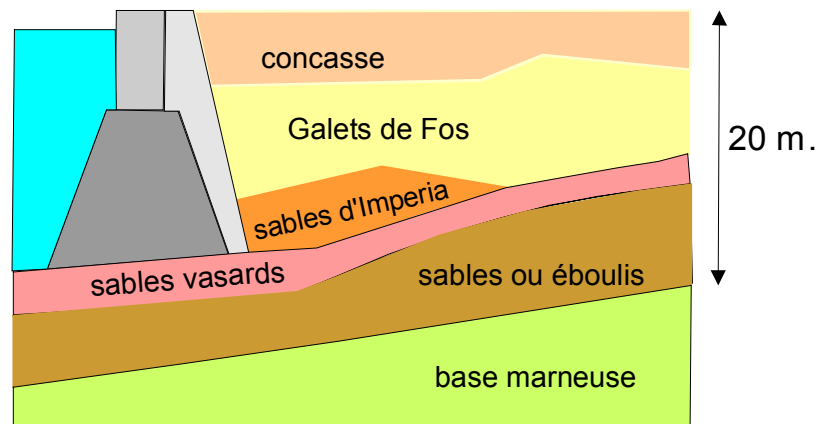
N°	zone	géologie	Mesures expérimentales (rap. spectraux)	H/V bruit de fond	Vitesse des ondes S	Calcul numérique Fréquence propre et amplification
A3	port site MUS	10 ^{aine} de m. de IV ^{aires} constitué de limons et d'argiles surmontant des calcaires marneux et marnes du Crétacé.	légère tendance à l'ampli. vers 1 et 3-5 Hz. et plus nettement de 8 à 15 Hz.	pic insignifiant vers 2-3 Hz. et une zone de plus forte amplification vers 10 Hz.	300 m/s (estimé)	7,5 Hz avec ampli. de 3 à 4
A5	ancien stade					2 à 2,5 Hz. avec ampli. de 4
A6	Place d'Armes			pas assez d'informations		3,3 à 6,6 Hz. avec ampli. de 4
T1	Rocher de Monaco Site ROC	écaïlle calcaire de jurassique	Site ne générant pas d'ampli. surtout pour les séismes proches		1700 m/s	5,6 et 8,5 Hz. avec ampli. de 3 à 5
T2	Jardin exotique et S ^{te} -Dévote site SUI-EXO	bord de falaises en calcaire massif du Jurassique	/	ampli. croissant avec la fréquence avec un niveau de 4 vers 10 Hz	/	ampli. certaines mais non chiffrables
R1	quartier Plati Site PLA	une 40 ^{aine} de m d'éboulis reposant sur un substratum de Crétacé sup.		pas assez d'informations	400 m/s (estimé)	2,5 Hz. avec ampli. de 3,5.
R2	versant Cimetière hôpital Site CMT	recouvrement d'une 40 ^{aine} de m d'éboulis sur du Crétacé sup.		pic très net à 2,2 Hz. Avec un niveau de 5.	400 m/s (estimé)	2,5 Hz avec ampli. de 3,5.
R3	jardin Princesse Antoinette Hector-Otto Site ANT	épaisseur des éboulis de 10 à 20m		amplification de 2 à 10 Hz avec un niveau maximal de 4 vers 5 Hz.		5 et 10 Hz avec ampli. de 3.5.
R4	Ténao Site ROM	Recouvrement d'éboulis de 20 à 30m	pas d'ampli. p/les séismes proches sous 10 Hz.		400 m/s (estimé)	3,3 à 5,5 Hz avec ampli. de 3,5.
0	Monégghetti Site MON	Début de l'ossature calcaire de l'unité de Monte-Carlo	pas d'ampli. importantes p/les séismes proches	rapports H/V très faible	/	/
0	Casino Site CSN	ossature calcaire de l'unité de Monte-Carlo	légère ampli. entre 2 et 3 Hz., un peu plus à partir de 6 Hz.	pic élevé vers 0,5 Hz en désaccord avec la géologie	/	/

Tableau 16: tableau des caractéristiques géologiques et géotechniques des différentes zones non-anthropiques avec les résultats principaux des mesures expérimentales et études numériques (CETE, 1992) et de la campagne de bruit de fond (CETE, 1992).

3.4.2. Les zones anthropiques (zones A1 ; A2 ; A4)

3.4.2.1. Le site de Fontvieille (zone A1)

Le terre-plein de Fontvieille est constitué par une grande accumulation anthropique de remblais argilo-sablo-caillouteux qui ont été déposés sur des terrains quaternaires. L'ensemble de ce terre-plein s'avance sur la mer d'environ 400 mètres.



Formations	Vs (m/s)	P
Concassé	182	2,03
Galets de Fos	177	2,04
Sables vasards	482	2,16
Fondations	616	2,2
Bases marneuses	1197	2,05

Figure 75 : Coupe Nord-sud du terre-plein de Fontvieille et tableau des caractéristiques du modèle de terrain (vitesse des ondes S mesurée par cross-hole et densité des terrains)

Les deux principales études sont le microzonage et la campagne de bruit de fond (CETE, 92) :

- microzonage : les mesures ont été réalisées au site CIR (Figure 73) là où l'épaisseur des remblais est la plus importante (Figure 75). Les rapports spectraux issus de la sismicité montraient la possibilité d'amplification d'un facteur 10 du site en basse fréquence (1 à 3 hertz) ;
- calculs simplifiés : ils ont indiqué que l'ensemble du terre-plein de Fontvieille a des fréquences propres qui varient, selon les formules utilisées, entre 1,75 hertz et 4 hertz, pour une amplification de 3 ;
- modélisation 1D : la fréquence fondamentale calculée diminue avec la profondeur du remblai, de 1,9 hertz à 1,2 hertz ;
- modélisation 2D : effectuée sur des profils du terre-plein, elle montre sur l'ensemble du remblai des amplifications d'un facteur 3 à 7,5 pour des fréquences comprises entre 2 et 3 hertz ;
- méthode expérimentale « H/V bruit de fond » : elle donne au niveau du site CIR une courbe R_{mod} très caractéristique du site avec une fréquence $f_0 = 2,1$ hertz.

Une étude spécifique a été réalisée sur l'immeuble « La Tramontane » situé à une centaine de mètres du site CIR. Des rapports spectraux ont été calculés entre la terrasse et le troisième sous-sol, et entre la terrasse et le rez-de-chaussée. Les résultats indiquent une amplification principale à 3 hertz (Bard, 1995).

3.4.2.2. Les terre-pleins du Sporting et du Larvotto (zones A4 et A2)

Les sites du Sporting et du Larvotto sont également un remblai anthropique.

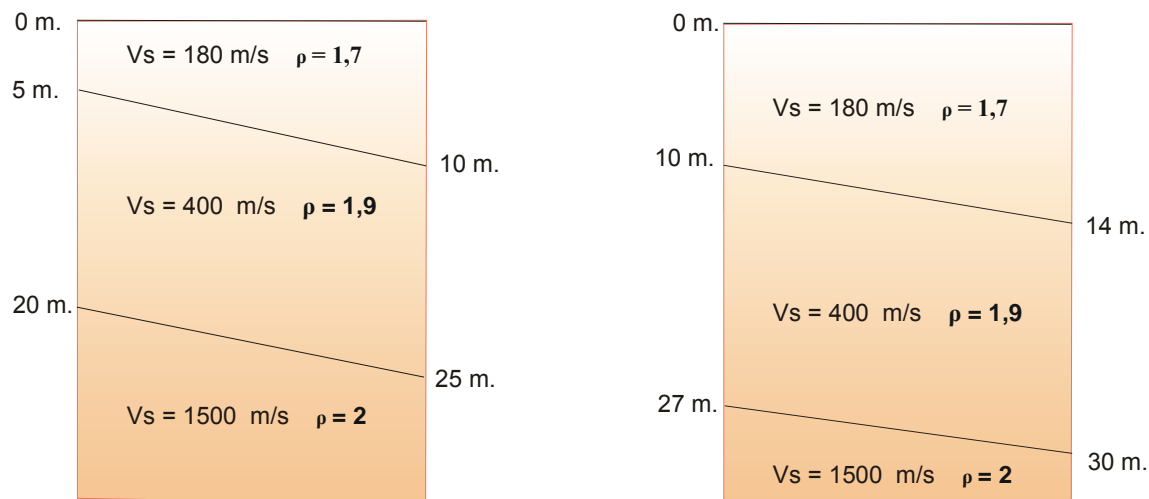


Figure 76 : modélisation des terre-pleins du Sporting et du Larvotto (CETE, 1992)

N°	Zone	Géologie	Mesures expérimentales	H/V bruit de fond	Calcul numérique Fréquence propre et amplification
A4	Sporting SBM	Épaisseur des remblais et du IV ^{aire} varie entre 20 et 25m.	A partir de 4-5 Hz. avec amplification de niveau 10	Amplification entre 4 et 6 Hz.	3,45 et 4,75 Hz. avec amplification de 4,7
A2	Larvotto LAR	Épaisseur des remblais et du IV ^{aire} varie entre 27 et 30m.	/	/	3 Hz. Avec amplification de 4,5

Tableau 17 : tableau des caractéristiques géologiques et géotechniques des zones anthropiques du Sporting et du Larvotto avec les résultats des mesures expérimentales (rapports spectraux et bruit de fond) et des calculs numériques par méthode simplifiée (CETE, 1992).

Les rapports donnent des amplifications moins fortes que celles du site de Fontvieille (CIR) mais plus étendues dans la gamme de fréquence.

4. Les nouveaux résultats concernant les effets de site à Monaco

4.1. Objectif de ces nouveaux résultats

Les mesures expérimentales précédentes (CETE, 1992) se sont déroulées du 21 février 1991 au 15 juin 1991 soit un peu moins de 4 mois. Comme nous l'avons déjà vu précédemment le nombre d'événements exploitables était en général trop faible pour pouvoir conclure de façon absolue (Duval, 1994).

Il était donc nécessaire d'installer un réseau permanent afin d'enregistrer divers événements exploitables pour corroborer les résultats de ces mesures expérimentales.

De nombreux séismes ont depuis été enregistrés dans diverses zones de la Principauté, nous présentons ici le réseau, les types de traitements appliqués aux différents enregistrements et les résultats de ces traitements pour trois secteurs principaux de la Principauté : le Rocher, la Condamine et Fontvieille.

4.2. Choix d'un site de référence pour le réseau de stations sismologiques de Monaco

La priorité a été de définir pour ce réseau un site de référence sur le territoire de la Principauté. Deux facteurs ont guidé le choix de ce site :

- il devait être le plus calme possible ce qui n'est pas toujours aisé en zone urbaine,
- il ne devait pas présenter d'amplification d'après les études antérieures.

C'est le site de la grotte du Jardin St Martin qui a été retenu sur le Rocher de Monaco près du Musée Océanographique (Figure 77). C'est le meilleur rapport signal / bruit de toute la Principauté pour plusieurs raisons :

- le Rocher de Monaco dans sa totalité est interdit aux poids lourds,
- aucun tunnel ou parking souterrain ne se trouve à proximité de ce site,
- le Rocher de Monaco étant une zone protégée au niveau de l'urbanisme, aucun chantier de grande envergure ne pollue le niveau du bruit ambiant du site,
- il se situe dans un jardin interdit au public,

Certaines réserves doivent être prises en compte dans le choix de ce site :

- le Rocher de Monaco correspond à une croupe topographique assez marquée qui peut générer des amplifications de l'ordre de 3 à 5 (Tableau 16) d'après les calculs numériques (CETE, 1992).
- la grotte des jardins Saint Martin est située à une vingtaine de mètres d'un bord de falaise qui peut également générer certaines amplifications.

Toutefois, au vu de l'urbanisation intense de la totalité de la Principauté, c'est le très bas niveau du bruit qui a été déterminant dans le choix du site de la Grotte Saint Martin comme site de référence. Ce choix a été de plus conforté par les enregistrements sismiques de la station ROC (CETE, 1992), située à quelques mètres de cette grotte, qui ne présentaient pas d'amplifications par rapport à ceux de la station de référence installée pour la campagne du microzonage de 1991 à Saint Jean Cap Ferrat (Tableau 16).



Figure 77 : Situation du site de référence (MONA), dans la grotte des jardins St Martin, sur le Rocher de Monaco, pour le réseau de stations sismologiques de la Principauté.

4.3. Caractéristiques et objectif du réseau de stations sismologiques de Monaco

L'objectif de ce réseau est triple :

- enregistrer des événements forts et posséder ainsi des accélérogrammes réels (Mondielli *et al.*, 1995), ce qui permettrait à partir des fonctions de transfert obtenues dans l'étude de site de recalculer les spectres pour chaque zone (CETE, 1992),
- enregistrer la micro-sismicité pour étudier la modification du signal sismique dans différentes zones de la Principauté (Mondielli *et al.*, 2002), et améliorer toujours plus précisément les résultats du microzonage,
- enregistrer le maximum d'événements sismiques pour définir à terme une loi d'atténuation propre à Monaco comme nous en avons démontré l'utilité dans le chapitre précédent.

Tout le réseau de stations sismiques de la Principauté est équipé en station Hathor 3.

Deux sites permanents ont été équipés d'accéléromètres CMG5 (Guralp) pour l'enregistrement des forts séismes et de velocimètres 3 composantes L4C 1 hertz Mark-Products pour l'enregistrement de la microsismicité. Il s'agit du site de référence situé sur le Rocher et de celui de la zone de Fontvieille qui d'après les études antérieures (CETE, 1992) et les nouveaux enregistrements présentent les amplifications maximales sur le territoire de Monaco. Trois autres velocimètres L4C 1 hertz Mark-Products sont disposés suivant les besoins en différentes zones de la Principauté.

Les stations utilisées dans cette étude fonctionnent en mode déclenché, avec des gains pré-ampli de 16 et des gains ADC de 1 pour chacune des composantes et une fréquence d'échantillonnage de 100 hertz.

4.4. Choix des traitements

Deux types de traitements ont été choisis en fonction des données disponibles et de l'objectif à atteindre, à savoir, la connaissance précise d'éventuels effets de site en Principauté.

Plus de 300 séismes ont été enregistrés entre 1997 et 2003 sur plusieurs stations réparties sur certains sites pouvant générer d'après les études antérieures des amplifications (CETE, 1992 ; Duval, 1994). D'après Fiel et Jacob (1995b) un nombre de séismes supérieur à 10 permet de donner précisément l'effet de site. Ces conditions ont à chaque fois été réunies.

Les stations installées étaient quelquefois configurées pour une autre application ou ont présenté des dysfonctionnements. Pour ces raisons nous avons appliqué la méthode des rapports spectraux uniquement lorsque les configurations des différentes stations étaient identiques et la méthode des fonctions récepteurs appelée aussi H/V séisme lorsqu'une seule station pouvait être exploitée.

Afin de valider et d'évaluer d'éventuelles différences entre les deux méthodes, les rapports spectraux site / référence ont été doublés par la méthode H/V séisme ou HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio). Cette validation permettra d'exploiter les *événements* enregistrés sur les divers sites même lorsque la station de référence est inopérante.

La méthode des fonctions récepteurs a été préférée à la méthode H/V bruit car elle retranscrit plus fidèlement les fréquences pour lesquelles des amplifications ont été observées par la méthode des rapports spectraux site / référence (Field et Jacob, 1995b). De plus dans une ville urbanisée comme celle de Monaco il est difficile d'avoir des enregistrements calmes du bruit de fond. Lachet (1996) attribue l'écart d'amplification entre les rapports issus du bruit de fond et ceux des mouvements forts, à la mise en vibration des structures comme les bâtiments. Lors d'un séisme fort, les structures sollicitées vont entrer en vibration générant des ondes de plus hautes fréquences qui ne sont donc pas prises en compte dans les mesures du bruit de fond. Les comparaisons entre les deux techniques bruit et séisme sur certains sites urbanisés peuvent donc aboutir à des résultats très différents. D'après Sabourault (1999) il n'est donc pas évident que les méthodes spectrales fondées sur l'analyse du bruit de fond sismique soient adaptées pour déterminer la fonction de transfert approprié pour un site donné.

4.5. Descriptions des traitements

Les traitements ont été réalisés sous format SAC (Seismic Analys Code) en collaboration avec Etor Querendez et en utilisant les codes mis au point par Stéphane Gaffet.

Tous les traitements concernent le début des ondes S car ce sont les plus énergétiques et donc les plus agressives pour les bâtiments

Tous les traitements sont réalisés de la manière suivante :

Chapitre 6 : Aléa local

- suppression de l'offset ;
- tapering de type hanning ;
- FFT (Fast Fourier Transform).

Puis pour chaque station, (référence et courantes)

Avec : S = spectres, H = amplitudes des horizontaux, V= amplitudes des verticaux, R = rapport spectral

- - spectres des horizontaux : $S_{NS}(f)$ et $S_{EW}(f)$
- - spectres des verticaux : $S_Z(f)$

Lissage arithmétique de type « moyenne glissante » sur une fenêtre de 3 points dans le cas de séismes très proches, 11 points dans les autres cas.

4.5.1. Les rapports spectraux site / référence

Les amplitudes des spectres s'écrivent donc, pour la station de référence et pour les stations courantes :

- amplitude des spectres horizontaux :
$$H(f) = \sqrt{\frac{S_{NS}^2(f) + S_{EW}^2(f)}{2}}$$

- amplitude des spectres verticaux :
$$V(f) = |S_Z(f)|$$

Les rapports spectraux deviennent donc :

- pour les voies horizontales:
$$R_H = \frac{H_{courante}(f)}{H_{ref}(f) + \varepsilon} \quad \text{avec} \quad \varepsilon = \frac{\text{Max}(H_{ref}(f))}{20}$$

- pour la voie verticale :
$$R_V = \frac{V_{courante}(f)}{V_{ref}(f) + \varepsilon} \quad \text{avec} \quad \varepsilon = \frac{\text{Max}(V_{ref}(f))}{20}$$

suivant les besoins un lissage arithmétique de type « moyenne glissante » des rapports sur une fenêtre de 3 points dans le cas de séismes très proches, 6 points dans les autres cas, est appliqué.

La fonction ε est ajoutée au dénominateur du rapport spectral pour annuler des possibles suramplifications générées par des fréquences de basse énergie ou par le bruit (Mari *et al.*, 1997). La valeur de « 20 » pour le facteur ε a été adoptée expérimentalement car elle est bien adaptée pour préserver l'amplitude des rapports calculés à l'intérieur de la bande fréquentielle énergétique et de les réduire progressivement lorsque l'énergie sismique décroît (Gaffet *et al.*, 2000).

4.5.2. Les rapports spectraux H / V séisme

Le principe de la méthode est à peu près le même que précédemment. Dans ce cas-ci, le bruit de fond est d'abord découpé en fenêtres de même longueur, puis le rapport est calculé pour chacune des fenêtres puis moyenné. Dans cette étude, cette méthode sera appliquée pour les ondes S (Lermo et Chavez Gàrcia, 1993 ; Field et Jacob, 1995b ; Théodulidis *et al.*, 1996).

A la suite du calcul des fonctions de transfert effectué sous SAC, nous avons calculé le rapport spectral H/V comme suit :

$$R_{H/V \text{ courante}} = \frac{H_{\text{courante}}(f)}{V_{\text{courante}}(f) + \varepsilon} = \frac{\sqrt{S_{NS}^2 \text{ courante}(f) + S_{EW}^2 \text{ courante}(f)}}{\sqrt{2 |S_Z \text{ courante}(f)|} + \varepsilon}$$

$$\text{avec } \varepsilon = \frac{\text{Max}(V_{\text{courante}}(f))}{20}$$

où $S_{EW}(f)$, $S_{NS}(f)$ et $S_Z(f)$ sont les spectres des voies est – ouest, nord – sud et verticale, et ε , comme déjà vu précédemment, est un facteur permettant de palier aux possibles problèmes de suramplification apparaissant au dénominateur (Mari *et al.*, 1997).

4.6. Les nouveaux résultats des effets de site

Le choix de l'emplacement des stations sismiques s'est fait en fonction de la représentativité du site de mesure par rapport à la zone géologique choisie mais aussi en fonction niveau de bruit qui peut être très important dans ce contexte très urbanisé.

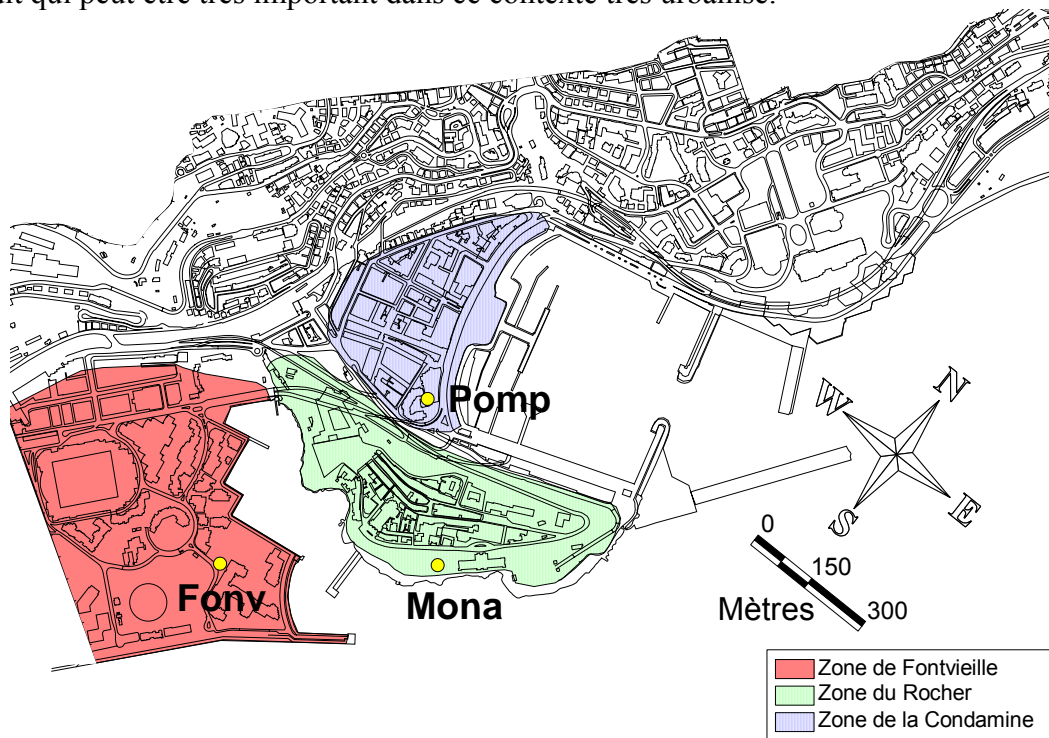


Figure 78 : Situation de la station de référence sur le site du Rocher (MONA) et des stations courantes du site de la Condamine (POMP) et du site de Fontvieille (FONV) sur fond de carte topographique (DEUC).

4.6.1. Le site de la Condamine (zone A3)

Il est constitué d'une dizaine de mètres de quaternaire constitué de limons et d'argiles surmontant des calcaires et marnes du Crétacé.

La méthode expérimentale des études antérieures (CETE, 1992) avait montré que pour le quartier du port (MUS) l'amplification est perceptible par rapport à Ferrat (site de référence) à partir de 8 Hertz (Tableau 16), elle avait montré aussi que le site du Rocher ne générât pas d'amplification contrairement aux résultats des études numériques.

La station de mesure POMP, située au troisième sous-sol de la caserne des pompiers dans le quartier de la Condamine, repose donc directement sur les terrains marneux du Crétacé.

4.6.1.1. Traitements d'une secousse représentative

Nous présentons ici l'interprétation des traitements du séisme du 19 décembre 2000 à 00h52 TU (crise sismique de Blausasc) pour les stations MONA et POMP (Figure 78).

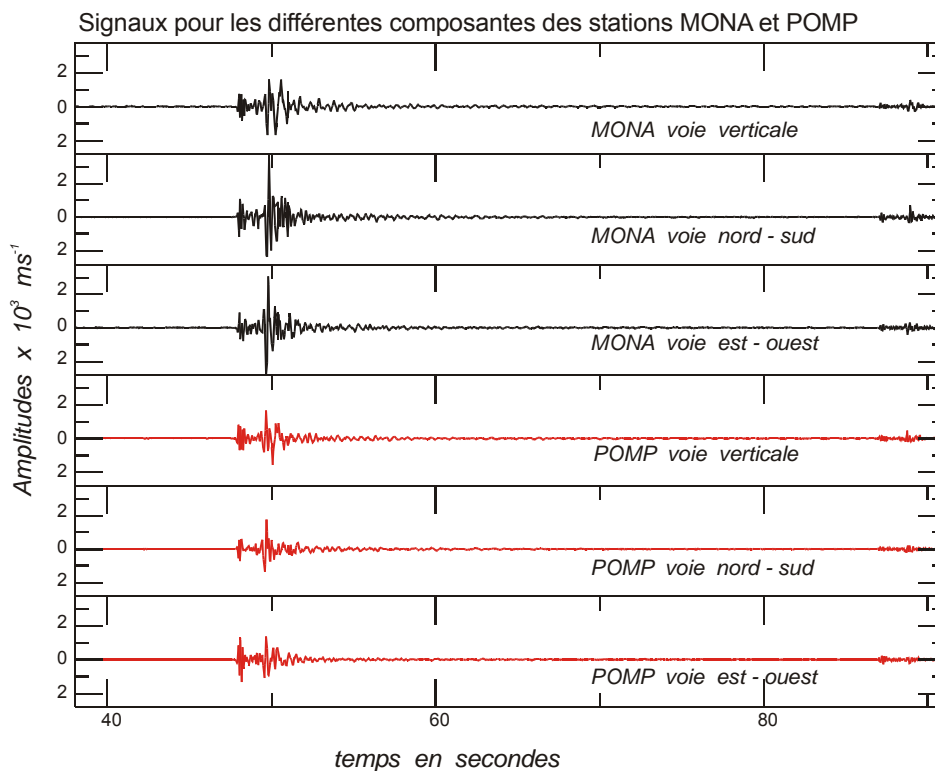


Figure 79 : Enregistrements le 19 décembre 2000 à 00h52 TU d'un séisme de magnitude 2.8 localisé à 9 km au Nord – Ouest de la Principauté pour les 3 voies des stations MONA et POMP.

La superposition des sismogrammes (Figure 80) permet de mettre en évidence des différences peu visibles dans la simple observation des sismogrammes, aussi bien au niveau des amplitudes qu'au niveau de la durée du signal qui peut traduire un piégeage des ondes au niveau d'un des sites.

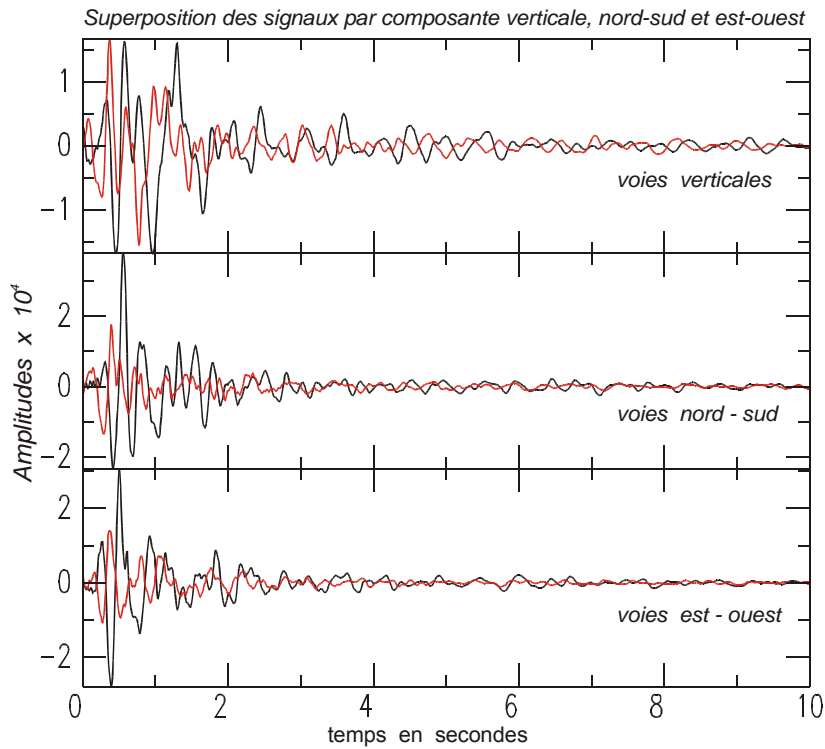


Figure 80 : Superposition des sismogrammes pour la secousse du 19 décembre 2000 à 00h52 TU pour les 3 voies des deux stations MONA (en noir) et POMP (en rouge).

Les spectres horizontaux et verticaux (Figure 81) permettent d'observer la répartition énergétique de la secousse dans le domaine fréquentiel, et de déterminer ainsi les gammes de fréquence d'amplitude maximum pour chacune des stations. D'éventuels effets de site pourraient déjà faire ressortir certaines fréquences dans un site et pas dans l'autre.

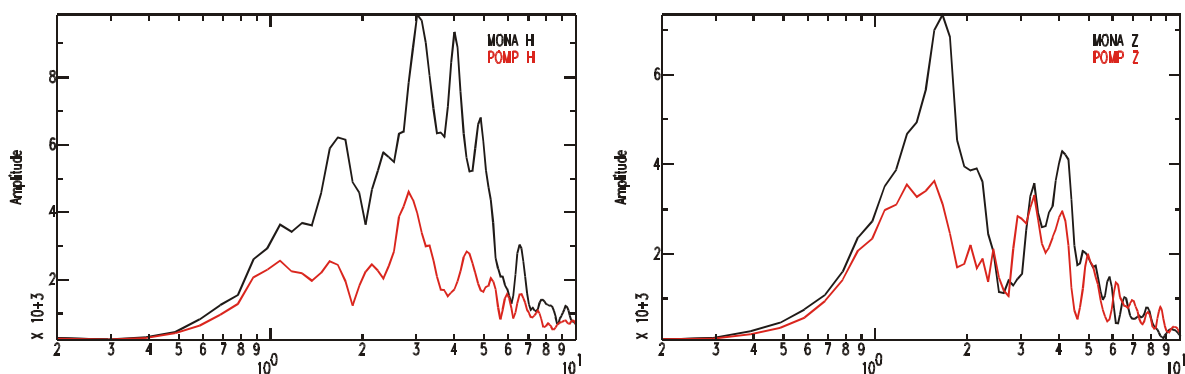


Figure 81: Spectres horizontaux (moyenne des voies est-ouest et nord-sud) et spectres verticaux pour les stations MONA et POMP

Les rapports spectraux horizontaux et verticaux (station courante / station de référence) mettent en évidence l'amplification du site de référence (MONA) par rapport à celui courant (POMP). Ce rapport atteint un maximum de 5 autour de 4 hertz pour les rapports spectraux horizontaux et un rapport 2 maximum pour les voies verticales avec même une légère amplification pour la station courante (POMP) sur certaines fréquences (Figure 82). La répartition spectrale est par contre très homogène et ne fait pas ressortir de fréquences d'amplifications particulières. Les rapports H/V mettent en évidence la fréquence caractéristique des sites. Pour les deux sites nous notons des amplifications autour de 3 hertz, légèrement plus importantes pour la station MONA, et un autre pic vers 5 hertz avec un rapport similaire pour les deux sites (Figure 82).

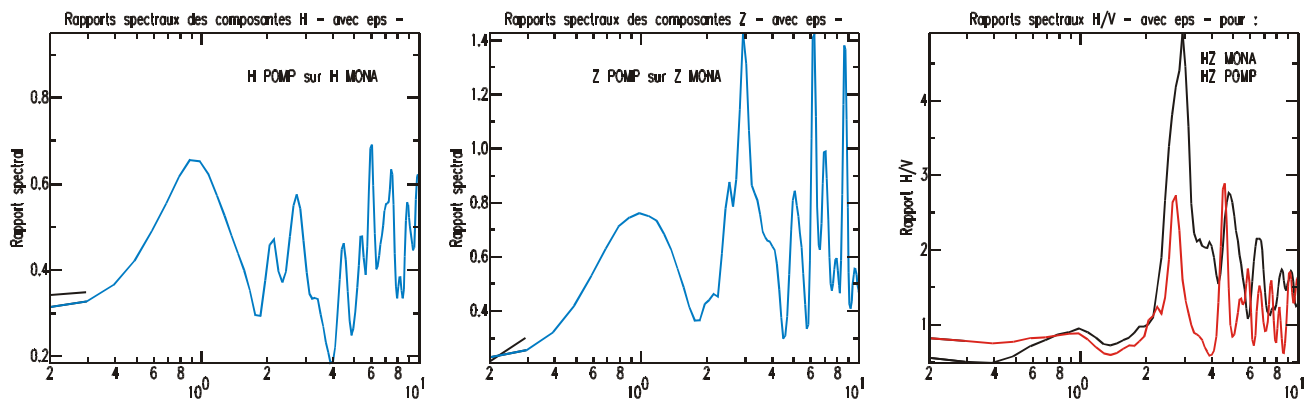


Figure 82: Rapports spectraux des sismogrammes pour la secousse du 19 décembre 2000 à 00h52 TU pour les stations MONA et POMP

Sur ce premier exemple le choix du site de référence peut être déjà contesté, cependant nous avons fait le choix de garder comme station de référence MONA pour trois raisons essentielles :

- la différence d'amplification entre les deux sites est faible,
- le site POMP situé dans un immeuble n'est pas totalement représentatif de la réponse du sol,
- le bruit ambiant est très faible pour la station MONA et assez élevé pour la station POMP.

4.6.1.2. Traitements des enregistrements du petit séisme de Peille et de la crise sismique de Blausasc.

Ce séisme pris en exemple a été enregistré durant une campagne de mesure dont l'objectif était d'étudier la fonction de transfert de la zone de la Condamine (station POMP située dans le 3^{ème} sous sol du bâtiment des sapeurs-pompiers) avec comme zone de référence le Rocher (station MONA). Cette campagne de mesure a permis d'enregistrer le petit séisme de Peille le 1^{er} novembre 1999 et la quasi totalité de la crise sismique de Blausasc des 19 et 20 décembre 2000. Nous avons réalisé l'ensemble des traitements de tous ces événements. Nous présentons dans le Tableau 18 la liste de ces *événements* et dans la Figure 83 les résultats des rapports spectraux moyennés.

date	heure	latitude	longitude	magnitude
19/12/00	00 :17	43.77	7.38	2.2
19/12/00	00 :24	43.76	7.36	2.1
19/12/00	00 :27	43.77	7.40	2.3
19/12/00	00 :31	43.77	7.39	2.2
19/12/00	00 :52	43.77	7.39	2.8
19/12/00	01 :03	43.76	7.37	2.0
19/12/00	01 :26	43.77	7.39	2.5
19/12/00	14 :20	43.78	7.37	3.4
19/12/00	14 :27	43.77	7.37	2.2
19/12/00	19 :06	43.68	7.27	2.0
19/12/00	19 :20	43.72	7.38	1.9
01/11/99	17 :22	43.78	7.36	3.3
01/11/99	18 :11	43.77	7.41	2.0
02/11/99	02 :05	43.77	7.38	1.9

Tableau 18 : Liste des enregistrements utilisés pour la détermination des réponses du site de la Condamine et du Rocher (données ReNaSS).

Tous ces séismes sont localisés dans une même zone à environ 8 km au Nord-Nord-Ouest de Monaco, nous considérerons qu'ils ont tous globalement la même distance épicentrale

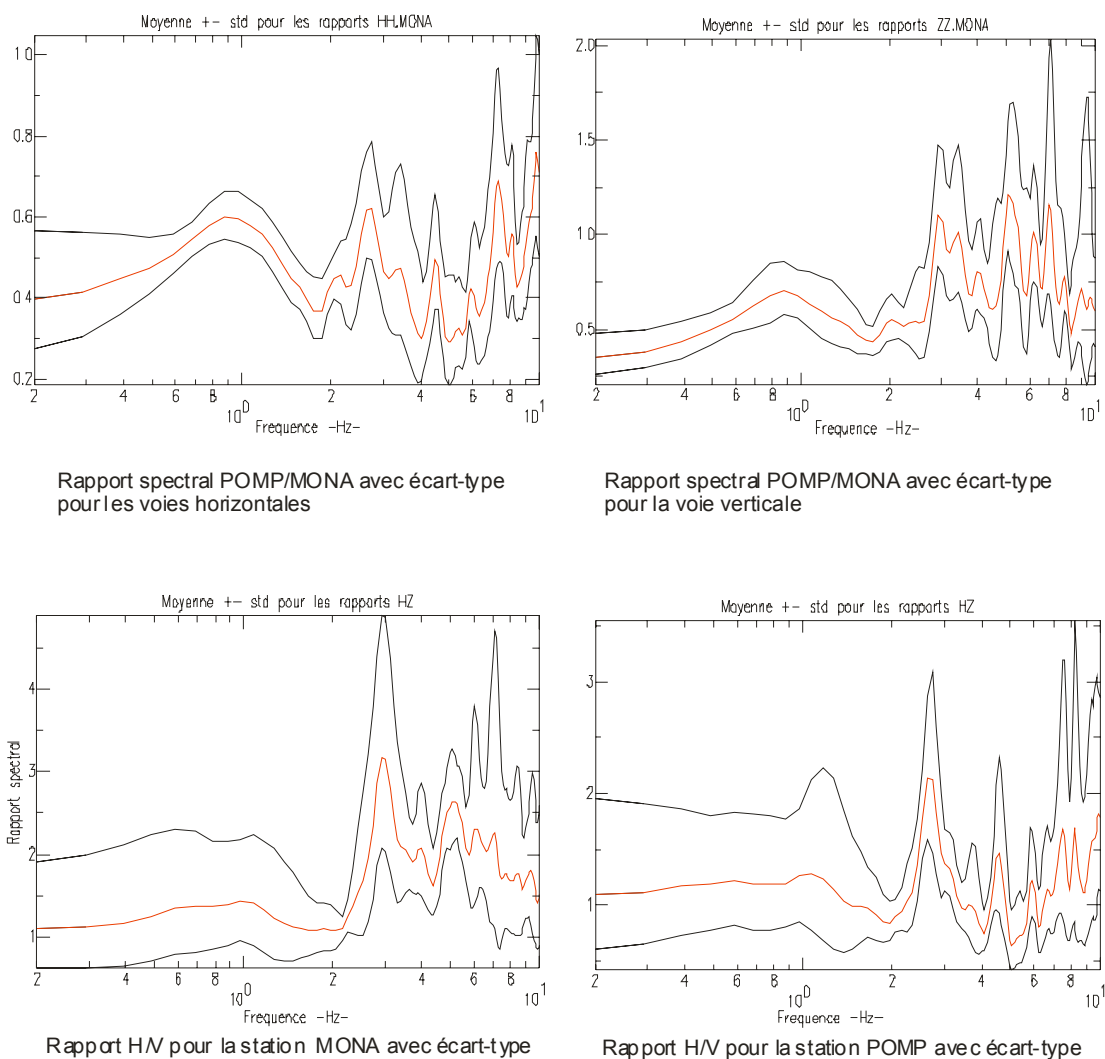


Figure 83 : traitement des secousses du petits séisme de Peille et de la crise sismique de Blausasc

Ces résultats moyennés confirment ceux de la secousse du 19 décembre 2000 à 00h52 :

- les rapports spectraux des voies horizontales sont en dessous de l'unité et montrent une amplification légère, mais globale, du site de MONA par rapport à celui de POMP, avec un rapport moyen de 3 autour de 4 hertz ;
- les rapports spectraux des voies verticales présentent moins de différence et s'inversent même dans une gamme entre 6 et 8 hertz. Nous considérerons cependant que ces deux sites ont une réponse assez proche ;
- les rapports H/V montrent que le pic autour de 3 hertz se retrouve au niveau des deux stations.

4.6.1.3. Conclusions sur le site de la Condamine et celui du Rocher

Les différences d'amplifications comparées avec celles enregistrées sur la station MUS en 1991 peuvent s'expliquer de diverses manières :

- la station POMP est située en dessous de la couche quaternaire, elle n'est donc pas influencée par le pouvoir amplificateur de la couche de limons et d'argiles ;
- la légère amplification du site de référence, situé sur une croupe topographique, par rapport au site de la Condamine « débarrassé » de sa couche superficielle semble cohérente ;
- la station POMP située au 3^{ème} sous-sol d'un immeuble est perturbée par la fréquence propre du bâtiment et ses résultats doivent être interprétés avec précaution.

D'après plusieurs expériences sur les effets de site (Lachet, 1996), une station sur laquelle aucun effet de site n'est observé présente un rapport H/V proche de 1. La station de mesure MONA considérée jusqu'alors comme le site de référence, présente quelques amplifications qui nuancent les résultats expérimentaux de l'étude du CETE qui n'en notaient aucune (CETE, 1992). Par contre ces résultats s'approchent de ceux des calculs numériques de cette même étude (Tableau 16) qui estimait que la configuration en croupe tabulaire de ce site pouvait générer des amplifications estimées à un facteur 3 par rapport au site de référence (l'écaille calcaire de Saint Jean Cap-Ferrat). Nous retrouvons ce facteur 3 uniquement pour certains pics de fréquence celui à 4 hertz et dans une moindre mesure un autre pic à 5 hertz.

Deux conclusions essentielles peuvent être tirées de cette campagne de mesure qui avait pour objectif d'étudier le comportement du site de la Condamine par rapport à celui du Rocher :

- les enregistrements réalisés sur le Rocher (MONA) devront donc être légèrement majorés d'un facteur 1,5 environ,
- le quartier de la Condamine, ne présente aucune amplification et démontre que si la couche superficielle qui entoure le bâtiment a un pouvoir amplificateur, elle n'a aucun effet sur la réponse des bâtiments reposant directement sur les terrains marno-calcaires du Crétacé.

Nous proposons :

- de garder la station MONA comme station de référence parce que son amplification est réduite et ne fait pas ressortir de fréquence particulière mais surtout parce qu'elle est de loin la plus calme et donc susceptible d'enregistrer le maximum d'événements.
- Pour le microzonage, d'englober la zone A3 (Condamine) dans la zone « O » qui comprend essentiellement les écaïlles jurassiques du Rocher et de Monte-Carlo.

4.6.2. Le site de Fontvieille (zone A1)

C'est le site qui présente le plus d'amplifications d'après les mesures expérimentales, les calculs numériques (CETE, 1992) et les mesures de bruit de fond (Duval, 1994). La structure du terre-plein et le résultat des études antérieures ont été décrits précédemment (p.148).

Le site d'enregistrement (station FONV) se situe au deuxième et dernier sous-sol du « parking du port » à Fontvieille (Figure 77). Cette infrastructure d'un étage présente des fondations qui reposent sur les terrains marneux du crétacé à une quinzaine de mètres de profondeur. Il n'existe plus de terrains vierges sur Fontvieille permettant de faire des enregistrements en champ libre. Nous avons pris l'option de choisir une infrastructure profonde sans immeuble.

L'observation d'un sismogramme (ici un séisme de magnitude 3.6 à 30 km) montre une nette amplification du site de Fontvieille par rapport à celui du Rocher avec une gamme de fréquence comprise entre 1 et 4 hertz pour les ondes de haute énergie (début des ondes S).

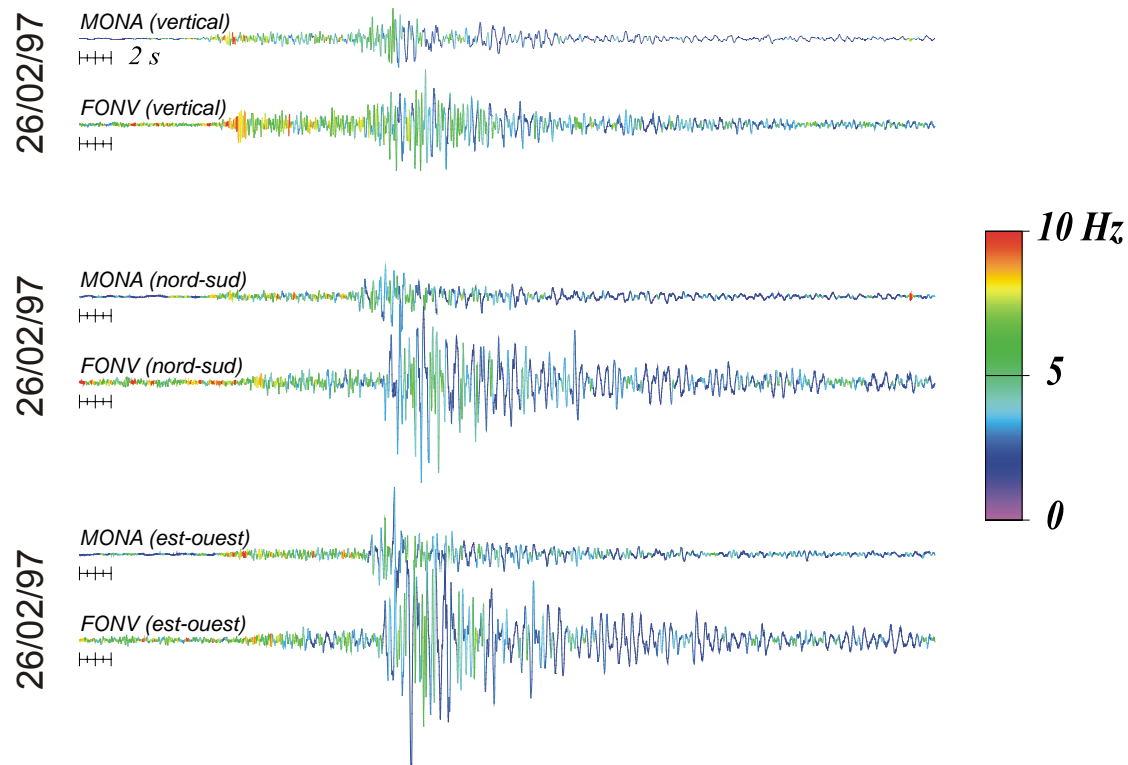


Figure 84 : Sismogrammes enregistrés sur MONA (Rocher) et FONV (terre-plein de Fontvieille) pour le séisme du 26 février 1997 de Magnitude 3.6 localisé à 31 kilomètres de Monaco représentés avec une figuration de la fréquence ; traitement réalisé par Stéphane Gaffet (Laboratoire de Géosciences Azur).

Chapitre 6 : Aléa local

Les trois secousses principales de la crise sismique de Blausasc, le séisme au large d'Impéria et celui du Lac de Garde ont tous été enregistrés par deux accéléromètres : un accéléromètre situé sur la zone de référence qui devrait présenter le minimum d'amplification et un autre sur le terre-plein de Fontvieille qui présente d'importantes amplifications. Ci-dessous les tableaux présentant les accélérations maximales enregistrées sur les trois composantes de chacune des stations :

19/12/2000 00h53 M=2.8 R=6,48 km. Blausasc

voies	Acc. m/s ² FONV	Acc. m/s ² MONA	Rap acc max.
Canal vertical	0,0179	0,009494	1,89
Canal nord - sud	0,0198	0,015144	1,31
Canal est - ouest	0,0233	0,012926	1,8

19/12/2000 14h20 M=3.4 R=8,68 km. Blausasc

voies	Acc. m/s ² FONV	Acc. m/s ² MONA	Rap acc max
Canal vertical	0,13	0,101166	1,29
Canal nord - sud	0,31	0,17153	1,81
Canal est - ouest	0,31	0,184294	1,68

20/12/2000 05h45 M=3 R=7,45 km. Blausasc

voies	Acc. m/s ² FONV	Acc. m/s ² MONA	Rap acc max
Canal vertical	0,0134	0,014008	0,96
Canal nord - sud	0,0307	0,013074	2,35
Canal est - ouest	0,0452	0,01378	3,28

11/04/2003 09h27 M=4.9 R=210 km Asti

voies	Acc. m/s ² FONV	Acc. m/s ² MONA	Rap acc max
Canal vertical	0,109	0,0097	11
Canal nord - sud	0,485	0,0162	25
Canal est - ouest	0,357	0,0154	35

23/11/2004 23h00 M= 5.2 R=402 km. Lac de Garde

voies	Acc. m/s ² FONV	Acc. m/s ² MONA	Rap acc max
Canal vertical	0,065	0,0059	11
Canal nord - sud	0,168	0,0067	29
Canal est - ouest	0,158	0,0045	23

Tableau 19: Accélérations maximales des séismes enregistrés à la fois sur Fontvieille et sur le Rocher (pour les trois secousses principales de la crise sismique de Blausasc les données ont été enregistrées sur une station RAFTEK sur le Rocher et Hathor 3 à Fontvieille tandis que les deux autres secousses l'ont été sur des stations Hathor 3).

Les séismes d'Asti et du lac de Garde présentent sur le terre-plein de Fontvieille des accélérations maximales 20 fois plus importantes que celles enregistrées sur le site du Rocher de Monaco. Les différences de rapport d'accélération entre les séismes proches et lointains peuvent s'expliquer par des effets de non linéarité (Comm. orale Bertrand, 2005). Les séismes locaux présentent en effet des accélérations au rocher beaucoup plus importantes que celles des séismes d'Asti ou du lac de Garde.

L'objectif est de caractériser précisément l'effet de site du terre-plein de Fontvieille et d'étudier le comportement d'un terrain anthropique en fonction de l'onde incidente. Plusieurs

paramètres pouvant influencer cet effet de site seront ainsi étudiés comme la variation de la distance épacentrale ou l'azimut du séisme.

Nous étudierons dans un premier temps le séisme de Boumerdès ou séisme d'Alger situé à plus de 800 km et très ressenti sur Monaco.

Dans un second temps une analyse sera réalisée sur l'ensemble des séismes proches (<800 km.) enregistrés sur Monaco depuis 1997 afin d'évaluer une variation potentielle de la fréquence caractéristique du site en fonction de la distance et de l'azimut.

4.6.2.1. Le séisme de Boumerdes ou séisme d'Alger

La secousse principale de la crise algérienne du 21 mai 2003 à 18h 44 (18h 46 à la station MONA), de magnitude 6.8MI, a été localisée au nord-est d'Alger, aux coordonnées 37.58° de latitude nord et 3.65° de longitude ouest et à une profondeur de 10 Km environ (données RéNaSS). La distance épacentrale de ce foyer par rapport à Monaco est de 800 kilomètres, pour un azimut par rapport au nord de 212°. Ce sont les ondes T, arrivées avec un décalage de 9 minutes, qui ont été ressenties nettement sur Monaco.

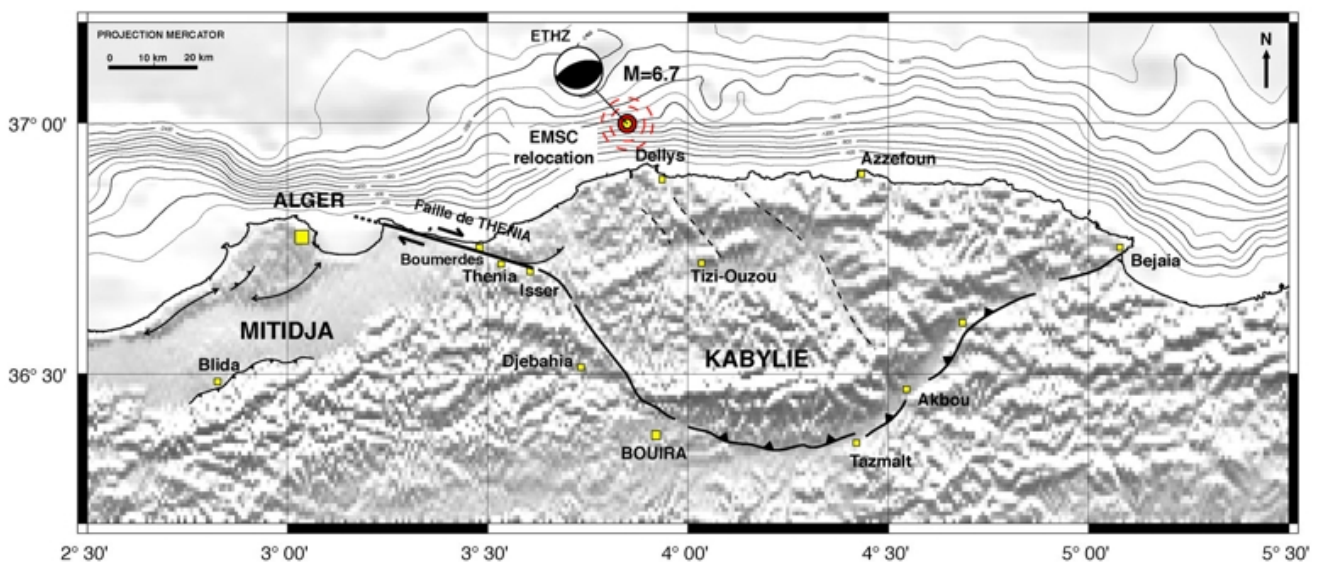
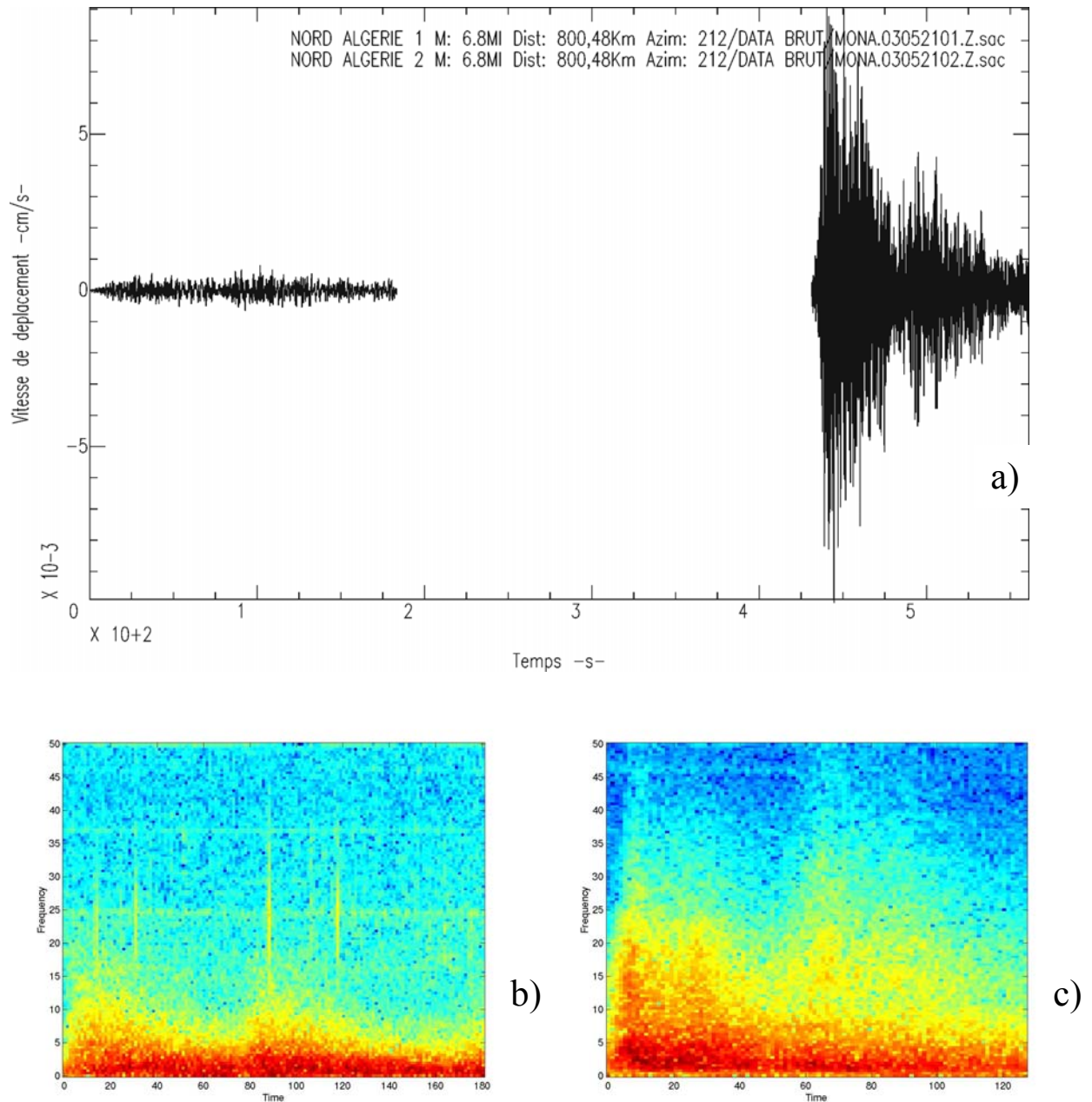


Figure 85 : Localisation et mécanisme au foyer du séisme principal de la crise algérienne sur carte tectonique (Dominguez, 2003).

Les épicentres des séismes sont localisés, pour la grande majorité, en mer. Ils sont peu dispersés, ce qui permet de s'affranchir des variations liées à l'azimut et à la distance par rapport à Monaco.

Au niveau de la façade méditerranéenne de l'Europe de l'ouest, le plus fort de l'énergie dégagée par les séismes de la crise algérienne a été véhiculée par les ondes T, ondes transmises à la masse d'eau océanique sus-jacente de l'hypocentre du séisme. L'atténuation de l'onde dans l'eau est quasi-nulle, d'où la différence d'amplitude d'un facteur 10 entre l'amplitude maximale de l'onde S et celle de l'onde T (Figure 86).

Une autre partie de l'énergie dégagée par la secousse principale s'est faite ressentir en mer et sur les côtes des îles Baléares par le passage d'un tsunami lié à un probable glissement de terrain sous-marin au droit de la faille en mouvement et qui sera étudié en fin de chapitre.



- a) sismogramme représentant les trains d'ondes P et S à gauche, et le train d'ondes T à droite
- b) spectrogramme obtenu pour les trains d'ondes P et S : partie gauche du sismogramme
- c) spectrogramme obtenu pour le train d'ondes T : partie droite du sismogramme

Figure 86 : Sismogrammes et spectrogrammes du séisme principal de la crise d'Algérie enregistré sur la station MONA (station de référence).

Chapitre 6 : Aléa local

Les événements qui ont été enregistrés par les stations sismologiques monégasques sont principalement les trains d'ondes T du séisme principal et de ses répliques. L'ensemble des événements enregistrés sur la station de référence MONA est repris dans le Tableau 20 suivant :

Lieu		Date	T orig.	Mag.	Lat.	Long.	Prof.	D. épicentre	azimut /N
NORD ALGERIE_1	L-A	21_05_03	18:44	6.8 MI	37,58	3,65	10	800,48	212
NORD ALGERIE_2	A	21_05_03	18:44	6.8 MI	37,58	3,65	10	800,48	212
NORD ALGERIE_3	A	21_05_03	18:51	5.2 MI	37,98	3,57	10	767,88	214
NORD ALGERIE_4	A	21_05_03	19:10	-	-	-	-	-	-
NORD ALGERIE_5	A	21_05_03	23:18	4.2 MI	37,88	3,84	10	761,03	212
NORD ALGERIE_6	A	21_05_03	23:23	4.5 MI	37,71	3,6	10	791,17	212
NORD ALGERIE_7	A	22_05_03	12:51	4.1 MI	37,85	3,84	10	763,87	211
NORD ALGERIE_8	A	22_05_03	13:57	4.7 MI	37,96	4,03	10	742,54	210
NORD ALGERIE_9	A	23_05_03	00:09	5.4 Mb	37,81	3,77	10	771,73	212
NORD ALGERIE_10	L-A	27_05_03	17:11	5.4 MI	37,67	3,65	10	791,98	212
NORD ALGERIE_11	A	27_05_03	17:11	5.4 MI	37,67	3,65	10	791,98	212
NORD ALGERIE_12	A	27_05_03	17:33	3.7 MI	37,93	3,74	10	762,2	212
NORD ALGERIE_13	A	28_05_03	06:58	4.5 MI	37,69	3,44	10	802,7	213
NORD ALGERIE_14	A	28_05_03	19:05	4.0 MI	37,72	3,79	10	779,1	211
NORD ALGERIE_15	A	29_05_03	02:15	4.6 MI	37,74	3,46	10	796,84	214
NORD ALGERIE_16	A	31_05_03	11:44	3.8 MI	37,9	3,75	10	764,42	212
NORD ALGERIE_17	A	01_06_03	02:54	3.9 MI	37,77	4,11	10	756,45	209
NORD ALGERIE_18	A	01_06_03	06:07	4.0 MI	37,89	3,98	10	752,06	211
NORD ALGERIE_19	A	02_06_03	08:20	3.8 MI	37,76	3,67	10	782,32	212
NORD ALGERIE_20	A	02_06_03	22:31	3.9 MI	37,68	3,5	10	799,98	213
NORD ALGERIE_21	A	06_06_03	03:13	3.9 MI	37,86	3,91	10	758,9	211
NORD ALGERIE_22	A	11_06_03	17:28	3.8 MI	37,8	3,94	10	762,93	210

En grisé les événements pour lesquels les ondes P et S ont été enregistrées sur Monaco (traités avec des fenêtres de 80s)
Tous les autres événements sont traités avec des fenêtres de 60s

Tableau 20 : Evénements de la crise algérienne enregistrés par la station MONA.

Les sismogrammes montrent pour les ondes T des vitesses de déplacement dix fois supérieures **a)** à celles des ondes P et S (Figure 86). Ce train d'ondes T est composé de hautes fréquences, dont certaines supérieures à 5 hertz plutôt caractéristiques de séismes proches. Cette gamme de haute fréquence est visible sur les spectrogrammes **c)** des ondes T, et quasi inexistante sur les spectrogrammes **b)** des trains d'ondes P et S.

Tout ceci s'explique aisément par le fait que l'onde T est canalisée, donc peu atténuée lors de son évolution dans la masse d'eau océanique contrairement aux ondes P et S qui, elles, se transmettent par la masse rocheuse (Cansi et Bethoux, 1985). Ainsi, un train d'ondes T, originaire d'un séisme situé à une distance de 800 Kilomètres va exciter le milieu principalement dans les hautes fréquences (entre 2 et 10 Hz) et quasiment pas dans les basses fréquences (en dessous de 1Hz). En dessous de ces fréquences (de 0.2 à 1 Hz), ce sont les ondes S qui vont provoquer des amplifications importantes du signal.

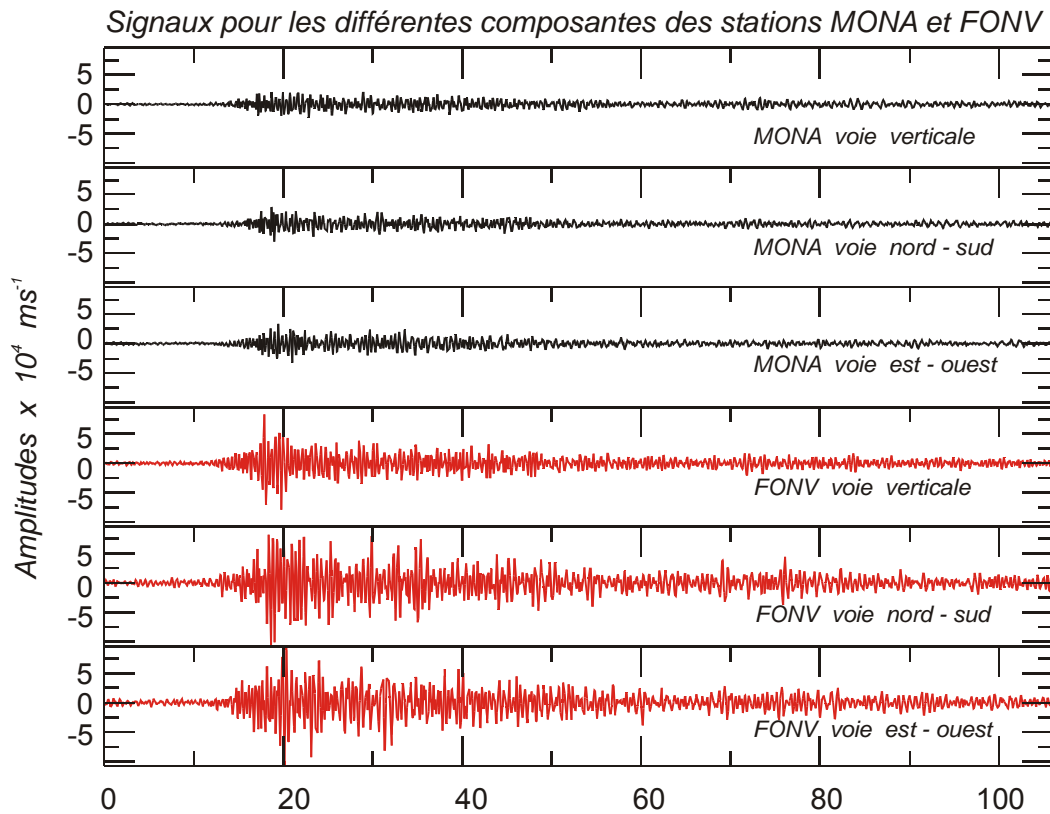


Figure 87 : Sismogrammes des ondes T du séisme principal de la crise sismique d'Alger de magnitude 6.8 enregistrées le 21 mai 2003 sur les stations MONA et FONV.

L'observation des sismogrammes pour cette secousse permet de mettre en évidence le pouvoir amplificateur très net du terre-plein de Fontvieille.

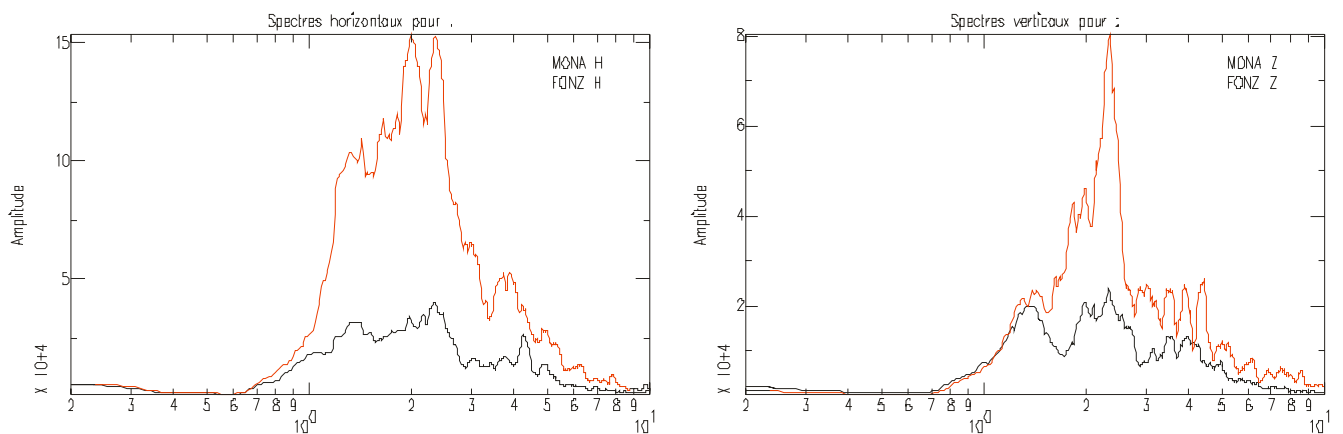


Figure 88 : Spectres des ondes T du séisme principal magnitude 6.8 de la crise sismique d'Alger du 21 mai 2003 sur les stations MONA et FONV.

Au niveau des spectres horizontaux, les trois pics principaux se retrouvent sur les deux stations (1,5 ; 2 et 2,5 Hz) mais avec un contenu énergétique de 4 à 5 fois plus important au niveau du site de Fontvieille.

Chapitre 6 : Aléa local

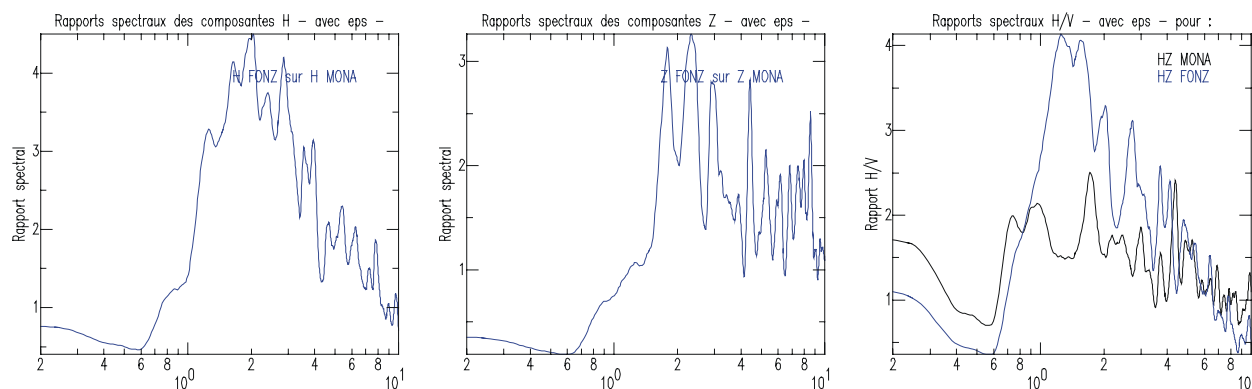


Figure 89 : Rapports spectraux horizontaux, verticaux et rapport H/V sisme des ondes T du séisme principal de magnitude 6.8 de la crise sismique d'Alger du 21 mai 2003.

Pour cette secousse, particulière par son éloignement et le contenu relativement haute fréquence du train d'ondes T, nous remarquons que :

- les voies horizontales ont une gamme de fréquence entre 1 et 4 Hz avec 2 pics à 1,8 et 2,5 Hz présentant un rapport de plus de 4 ;
- les voies verticales ont une gamme de fréquence amplifiée sur une plus large bande que celle des voies horizontales, de 1,5 Hz à 9 Hz, avec un rapport un peu moins élevé ;
- sur le rapport H/V une gamme de fréquence dominante entre 1 et 3 Hz.

Nous avons ensuite réalisé ces mêmes traitements moyennés pour la totalité des événements (principales répliques du séisme de Boumerdès) enregistrés sur la station de référence (MONA) et la station courante (FONV).

date	heure	M	lat	long	D epi	Az.
21/05/03	18 :44	6.8	37,58	3,65	800,48	212
21/05/03	18 :51	5.2	37,98	3,57	767,68	214
21/05/03	23 :18	4.2	37,88	3,84	761,03	212
22/05/03	13 :57	4.7	37,96	4,03	742,54	210
23/05/03	00 :09	5.4	37,81	3,77	771,73	212
27/05/03	17 :11	5.4	37,67	3,65	791,98	212
28/05/03	19 :05	4.0	37,72	3,79	779,10	211
29/05/03	02 :15	4.6	37,74	3,46	796,4	214

Tableau 21 : Liste des séismes de la crise algérienne enregistrés sur les stations MONA et FONV et leurs caractéristiques (données ReNaSS).

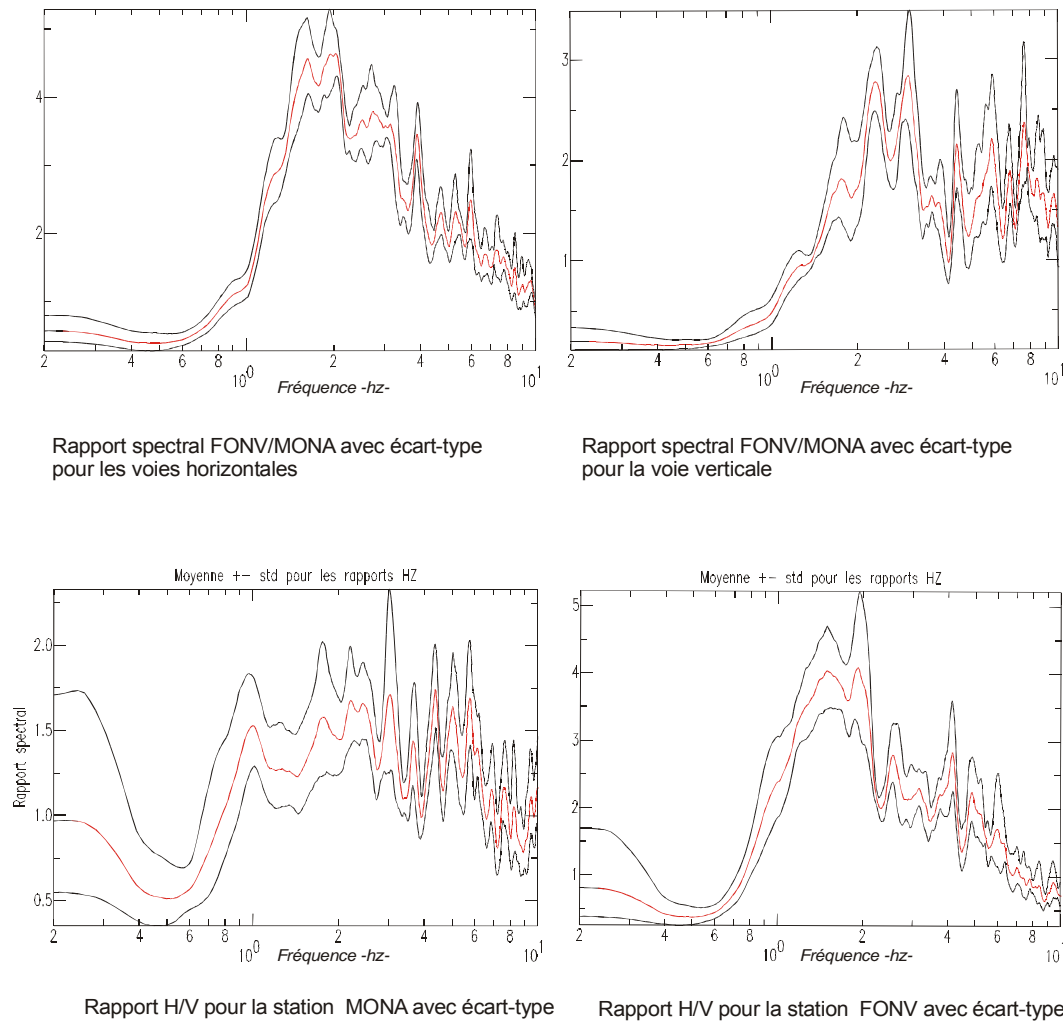


Figure 90 : Traitements de l'ensemble des séismes de la crise algérienne ressentis à Monaco en mai 2003 (traitement des ondes les plus énergétiques, ondes T)

L'ensemble des enregistrements des séismes de la crise d'Alger confirme les résultats établis pour la réaction du terre-plein de Fontvieille lors du choc principal de magnitude 6.8 :

- pour les voies horizontales deux gammes de fréquences particulières sont distinguées. La gamme principale entre 1,5 et 2 hertz avec un rapport de 4,5 et une gamme de fréquence entre 2,5 et 4 hertz avec un rapport de 4 ;
- pour les voies verticales, une gamme de fréquence de 2 à 3,5 hertz avec un rapport de 3 environ ;
- sur le rapport H/V une gamme de fréquence dominante entre 1 et 2,5 hertz pour le terre-plein de Fontvieille.

4.6.2.2. Recherche d'une modification de la fréquence caractéristique en fonction de l'azimut et de la distance.

Ces recherches sont réalisées sur les rapports spectraux et les rapports H/Vséisme des événements les plus représentatifs.

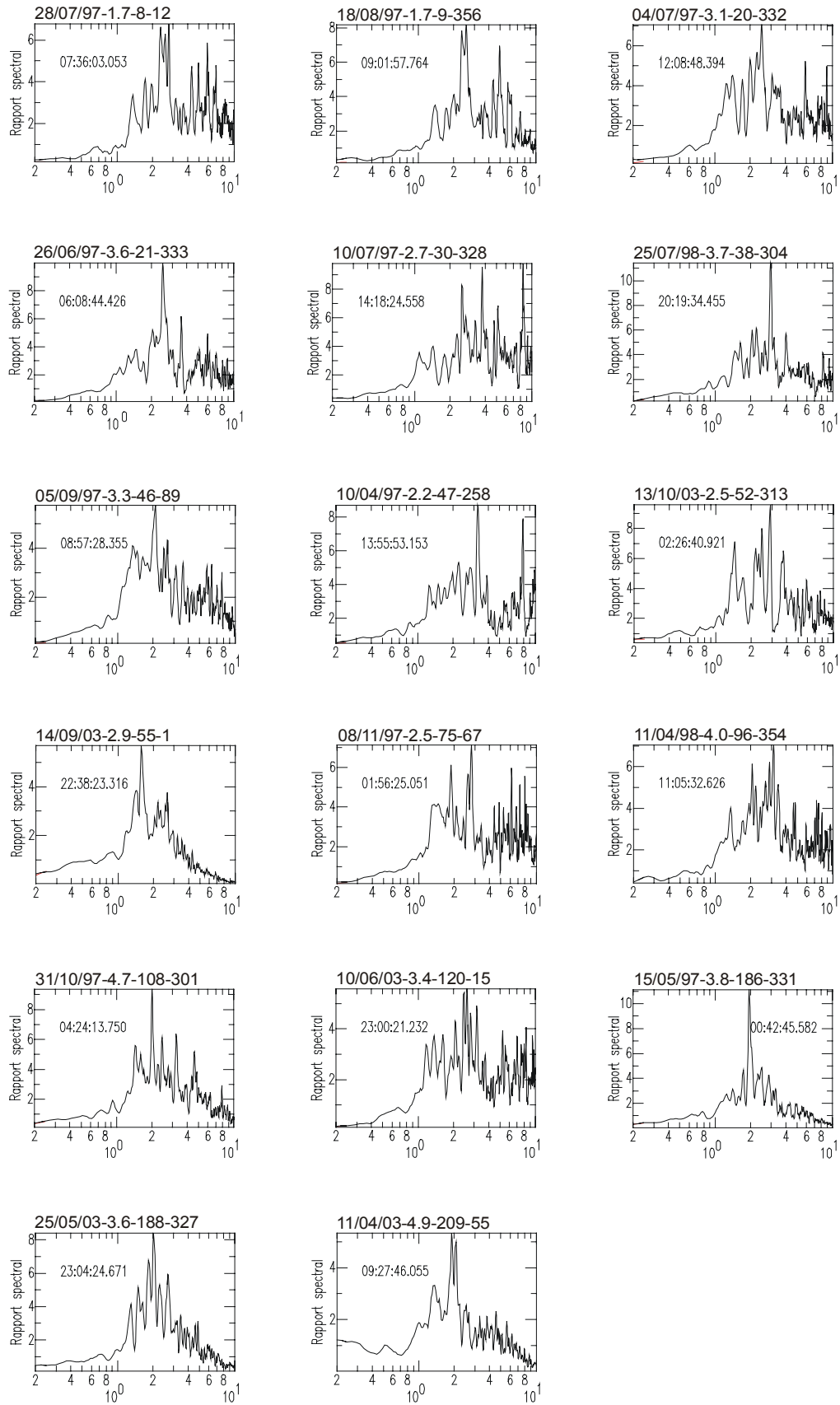


Figure 91 : Rapports spectraux horizontaux (station courante FONV/ station de référence MONA) pour des événements enregistrés de 1997 à 2003 (AA/MM/JJ-magnitude-distance épacentrale-azimut).

Les rapports spectraux FONV/MONA de ces 17 séismes montrent tous une amplification d'un rapport 6 à 10 entre 2 et 3 hertz. En dessous de 100 kilomètres la moitié des événements ont une fréquence dominante à 3 hertz et l'autre moitié entre 2 et 3 hertz. A une distance supérieure à 100 kilomètres la fréquence semble se concentrer autour de 2 hertz. La même remarque peut être faite pour les résultats de l'étude sur la crise sismique d'Algérie (Figure 90). La fréquence de résonance et son niveau d'amplification diminuent lorsque les profils de sols sont soumis à de fortes accélérations. Ceci illustre le phénomène de non linéarité de ces sols probablement combiné au contenu fréquentiel de chaque enregistrement (comm. orale Bertrand, 2005). L'azimut ne semble pas avoir d'incidence sur la variation de la fréquence propre. Ces observations confirment les conclusions sur la méthode des rapports spectraux des tests faits par Lebrun (1997) à savoir que les résultats sont indépendants de l'azimut des séismes et de leur distance épacentrale.

Ces résultats issus de l'analyse de 17 séismes représentatifs corroborent ceux du microzonage (CETE, 1992) en précisant toutefois que 14 d'entre eux présentent un pic d'amplification entre 2 et 3 hertz, un seul à 1,5 hertz et deux entre 3 et 4 hertz.

Nous n'interpréterons pas le niveau atteint par les rapports spectraux H/V séismes (Figure 92) qui déterminent au mieux la fréquence de résonance (Riepl *et al.*, 1993).

Nous observons un décalage de la zone de fréquence maximum qui était de 2 à 3 hertz pour 80% des rapports spectraux site / référence (Figure 91) à une zone de fréquence vers les 1 à 2 hertz pour les rapports spectraux H / V séismes (Figure 92). Cette légère différence peut s'expliquer par les fréquences dominantes à 3 hertz des rapports spectraux site / référence des voies verticales qui influent sur le résultat des rapports H / V séismes du terre-plein de Fontvieille vers la gamme de fréquence de 1 à 2 hertz.

Aucune variabilité des fréquences dominantes en fonction de l'azimut ou de la distance épacentrale n'est mise en évidence par la méthode des fonctions récepteurs.

Conformément aux observations de Théodulidis *et al.* (1996) il existe une bonne corrélation entre les rapports spectraux et les fonctions récepteurs. Ces dernières peuvent donc être exploitées en cas de dysfonctionnement de la station de référence.

En conclusion :

- aucune influence de l'azimut ou de la distance épacentrale n'a été observée,
- l'ensemble de ces analyses confirme pour le terre-plein de Fontvieille une gamme de fréquence amplifiée d'un rapport 6 à 10 entre 1,5 et 3 hertz.

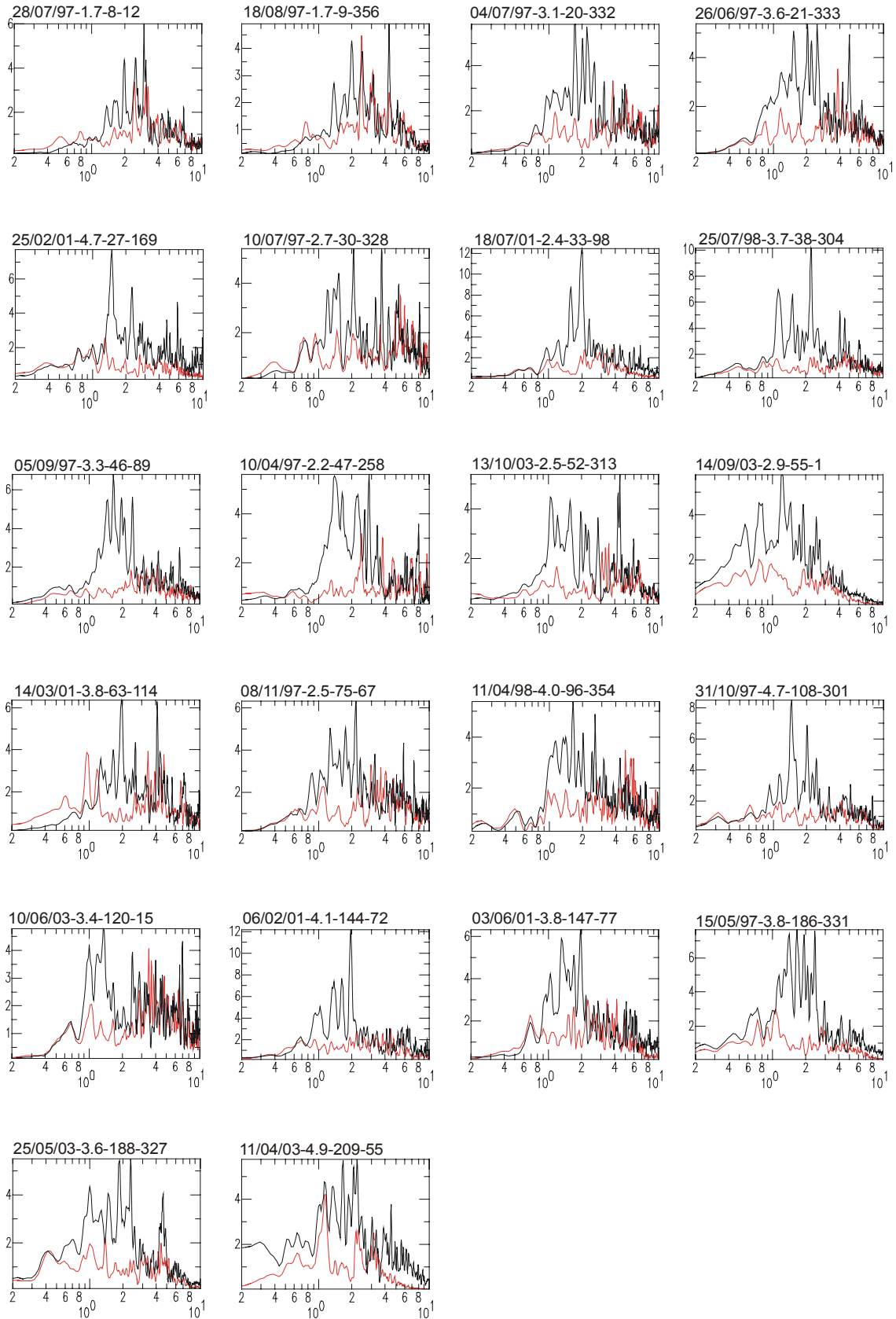


Figure 92 : rapports spectraux H / V séismes pour des événements enregistrés de 1997 à 2003 sur la station FONV en noir et MONA en rouge (AA/MM/JJ – magnitude - distance épicentrale - azimuth).

5. Analyse des dégâts de 1887

5.1. Méthodologie

Dans notre région, à sismicité modérée, des archives détaillées sur les dégâts occasionnés par un séisme sont de grandes valeurs. Elles permettent :

- de se rendre compte, au travers des dégâts infligés à un bâti connu, de la violence de la secousse qui a et qui pourrait à nouveau affecter le site étudié ;
- de faire une projection de ces dégâts sur l'urbanisation actuelle si ce séisme venait à se reproduire.

D'une part, au niveau de Monaco, l'exploitation de ces archives permet, sous certaines conditions, de corroborer les résultats du microzonage pour un mouvement fort et surtout de diagnostiquer l'intérêt d'un renforcement du bâti ancien.

D'autre part, l'analyse des dégâts permet de définir l'intensité macrosismique qui joue un rôle majeur dans les études du risque sismique. En Europe c'est l'échelle MSK (Medvedev - Sponheur - Karnik) de 1964 qui est la plus répandue et qui est à l'origine de l'EMS-98 (l'échelle macrosismique Européenne) qui sera utilisée dans cette étude.

Ces archives sur le séisme du 23 février 1887 à Monaco sont pour la première fois exploitées dans le cadre de cette étude. L'analyse de ces dégâts a deux objectifs :

- étudier la répartition des dommages dans la ville, et essayer d'en expliquer la causalité notamment pour les zones les plus touchées ;
- définir sur des éléments concrets l'intensité macrosismique exacte atteinte lors de ce séisme.

Rappelons que le tremblement de terre de 1887 est le seul séisme majeur pour lequel nous avons la certitude de dégâts occasionnés au bâti monégasque. Cette analyse a pu se réaliser grâce au service des archives du Palais Princier, aux recherches effectuées en collaboration avec le service du cadastre de la Principauté (DEUC) et aux remarques avisées de l'historien monégasque Claude Passet.

5.2. Etat des structures et de l'urbanisation en 1887

L'exploitation de l'analyse des dommages aux structures urbaines a un sens à partir du moment où le développement de l'évolution urbanistique est bien connue. En effet l'interprétation de la répartition des dégâts se fait en fonction de la typologie constructive des bâtiments, de leur vétusté ainsi que d'éventuels effets de site.

Au début du XVI^{ème} siècle la ville fut reconstruite progressivement. Elle s'étendait de l'actuelle limite Est de la Place du Palais jusqu'au niveau de l'actuelle place de la Mairie. Les maisons de cette époque avaient un étage au maximum. Au XVII^{ème} siècle l'extension spatiale reste la même mais un étage est fréquemment rajouté. La chapelle de la Miséricorde est construite en 1639. Seuls les bâtiments de l'hôtel des monnaies (mitoyen à l'actuelle Mairie) et la fonderie générateurs de nuisances sonores prennent place en limite Est de la ville.

Chapitre 6 : Aléa local

Jusqu'au XVIII^{ème} siècle, la ville ne s'étend pas géographiquement mais son extension continue à se faire verticalement avec des surélévations. Sa limite se situe toujours au niveau de la Chapelle de la Miséricorde et de la Mairie. C'est à partir de 1850 que la partie Est se construit progressivement avec l'école des filles, l'établissement des frères des écoles chrétiennes, l'hôtel Dieu, la chapelle et le Collège de la Visitation.

En 1887 le secteur urbanisé du Rocher englobe le Palais, l'ancienne et la nouvelle ville.



Figure 93 : Le Rocher de Monaco en 1865, une extension urbanistique similaire à l'actuelle mais avec des maisons qui ne dépassaient pas deux à trois étages.

La vieille ville est composée d'un ensemble de maisons mitoyennes de deux à trois étages environ séparées par des ruelles étroites. La nouvelle ville est le quartier situé immédiatement à l'Est. Il est délimité par la ligne NS chapelle de la Miséricorde - actuelle Mairie. Ce sont de vastes bâtisses qui ont, en 1887, moins de trente ans d'âge (Figure 93). Le Rocher de Monaco présente donc la même extension spatiale de l'urbanisation qu'aujourd'hui.

Le secteur de la Condamine a vu son urbanisation se développer avec l'arrivée du chemin de fer dans les années 1860. De cette « campagne » qui s'étendait dans les années 1850 du pied du Rocher au vallon Ste Devote, seuls deux espaces verts subsistent en 1887, le plus important se situe dans la zone sud de ce quartier au pied du Rocher et le second plus au nord vers l'église Sainte Devote (Figure 94).

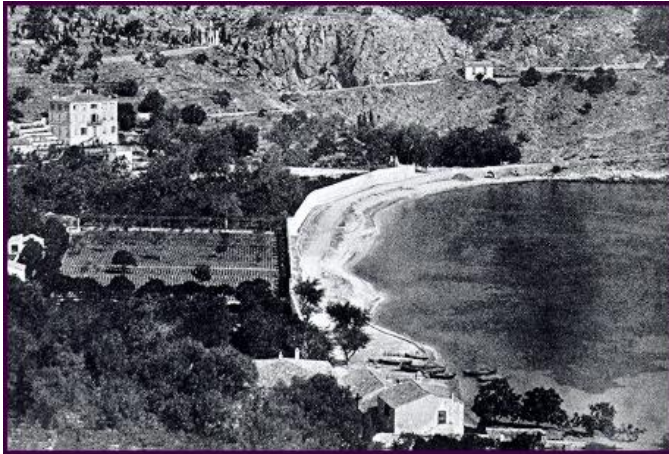


Figure 94 : Vues du secteur de la Condamine dans les années 1850, une plage et une campagne avec deux uniques bâtisses.



Figure 95 : Quartier de la Condamine en 1887, exceptées les deux bâtisses cerclées de jaune et déjà visibles sur les photos des années 1850 (figure précédente) toutes les maisons ont moins de trente ans.

En une trentaine d'années la Condamine s'est considérablement urbanisée. En 1887, la plupart des maisons avaient moins de trente ans. L'édification du quartier de la Condamine s'est faite en même temps que celle de la nouvelle ville sur le Rocher de Monaco.

Dès les années 1880, des maisons de plusieurs étages étaient construites en bordure de falaise comme par exemple dans le vallon Sainte Dévote (figure 4).

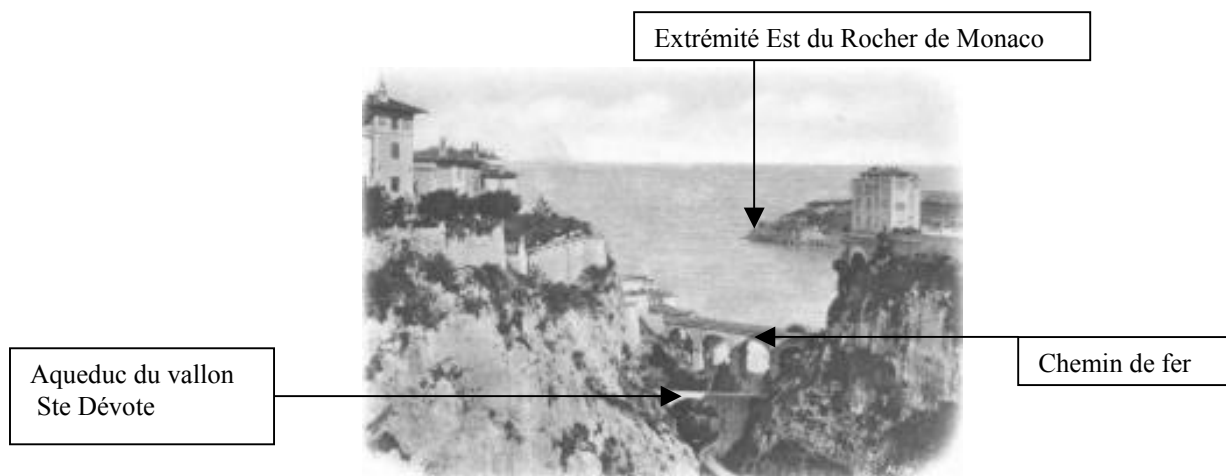


Figure 96 : falaises du vallon Ste Dévote dans les années 1880, point de vue en amont de l'ancienne cascade au niveau de l'actuel pont Ste Dévote.

Le quartier de Monte-Carlo présente une urbanisation moins dense que celle du quartier de la Condamine. Toutefois de vastes bâtisses et de nombreuses villas avec jardins sont déjà construites autour du Casino.

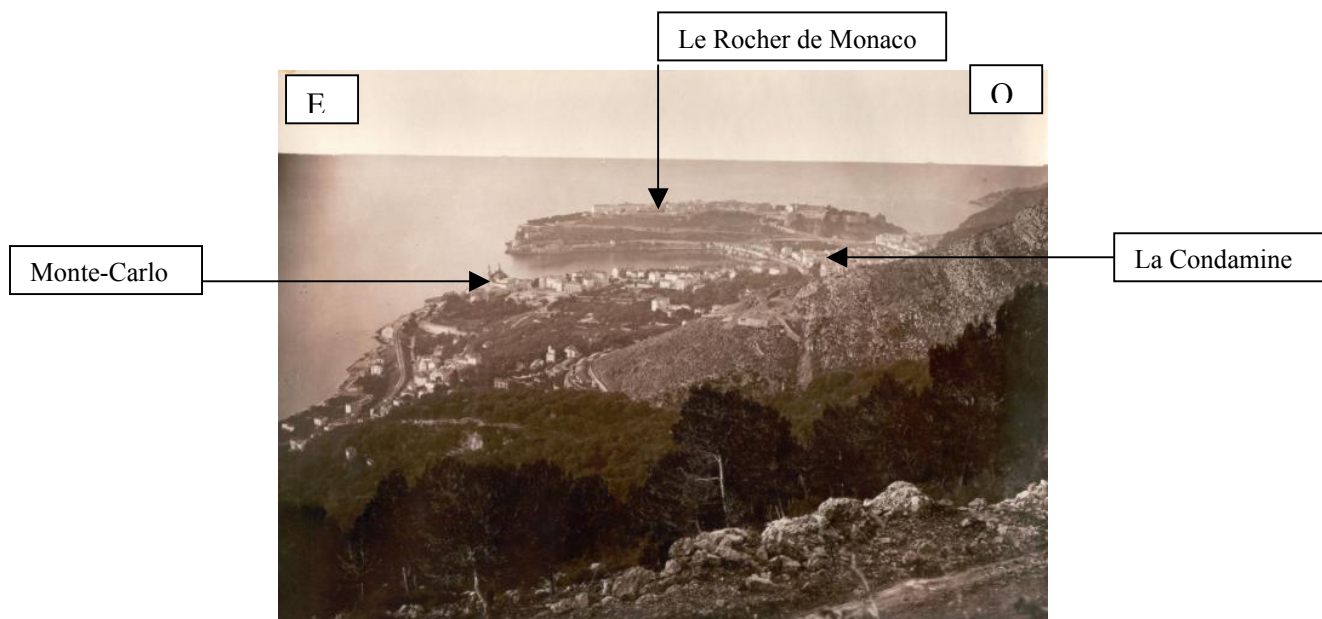


Figure 97 : le quartier de Saint Roman au premier plan avec Monte-Carlo autour du Casino et le Rocher de Monaco au dernier plan dans les années 1880. Photographie prise sur les pentes du versant sud du Mont Agel.

Les maisons les plus anciennes sont composées de moellons maçonnés, de pierres non taillées ou travaillées au marteau. Les murs ont en moyenne une épaisseur de 60 cm à la base et de 40 cm dans les parties hautes des maisons. Les planchers ont des ossatures en bois et les façades étaient badigeonnées de lait de chaux grasse teintée.



Figure 98 : Coupe réalisée dans les murs de l'immeuble situé dans la vieille ville sur le Rocher à l'angle de la rue de Vedel et de la rue Emile de Loth lors de sa réhabilitation. Photo des soubassements (cliché : O. Arnulf).

Les quartiers de Fontvieille, du Larvotto et du Sporting construits sur des terre-pleins n'existaient pas à l'époque. La comparaison avec le microzonage est donc limitée aux seuls quartiers édifiés sur des terrains naturels.

5.3. Moyens d'études des dégâts

Des recherches dans les archives du Palais Princier ont permis de retrouver trois rapports concernant le tremblement de terre du 23 février 1887, dont l'analyse détaillée permet de connaître la répartition et le type de dégâts sur le bâti monégasque :

- le rapport établi par le Maire de Monaco le 24 février (**annexe 6**) qui signale les principales maisons touchées repose sur une appréciation visuelle,
- le rapport daté du 26 février (**annexe 7**), plus technique, est issu d'une Commission spécialement nommée par le Comité des Travaux Publics. Ce rapport, réalisé par des experts, a pris en compte des bâtisses dont les dégâts présentaient un danger pour la sécurité et qui nécessitaient, de la part des propriétaires, des réparations,
- le rapport de visite concernant le Palais deux jours après le séisme (**annexe 8**).

C'est le rapport de la Commission qui aura le plus de poids dans la détermination des zones de dommages. Cependant ce rapport concerne uniquement les bâtiments n'appartenant pas à l'Etat.

5.4. Description des dégâts

L'objectif de cette description est de donner une vision globale des dégâts engendrés par la secousse du 23 février 1887 sur le bâti monégasque et de définir précisément l'intensité macrosismique atteinte en Principauté.

Nous avons fait figurer les principales maisons touchées qui ont nécessité des réparations sur 4 extraits du plan d'époque (annuaire Monaco 1887). Les limites de ces 4 zones sont tracées sur la carte géologique et topographique actuelle afin de les situer dans le contexte urbanistique actuel.

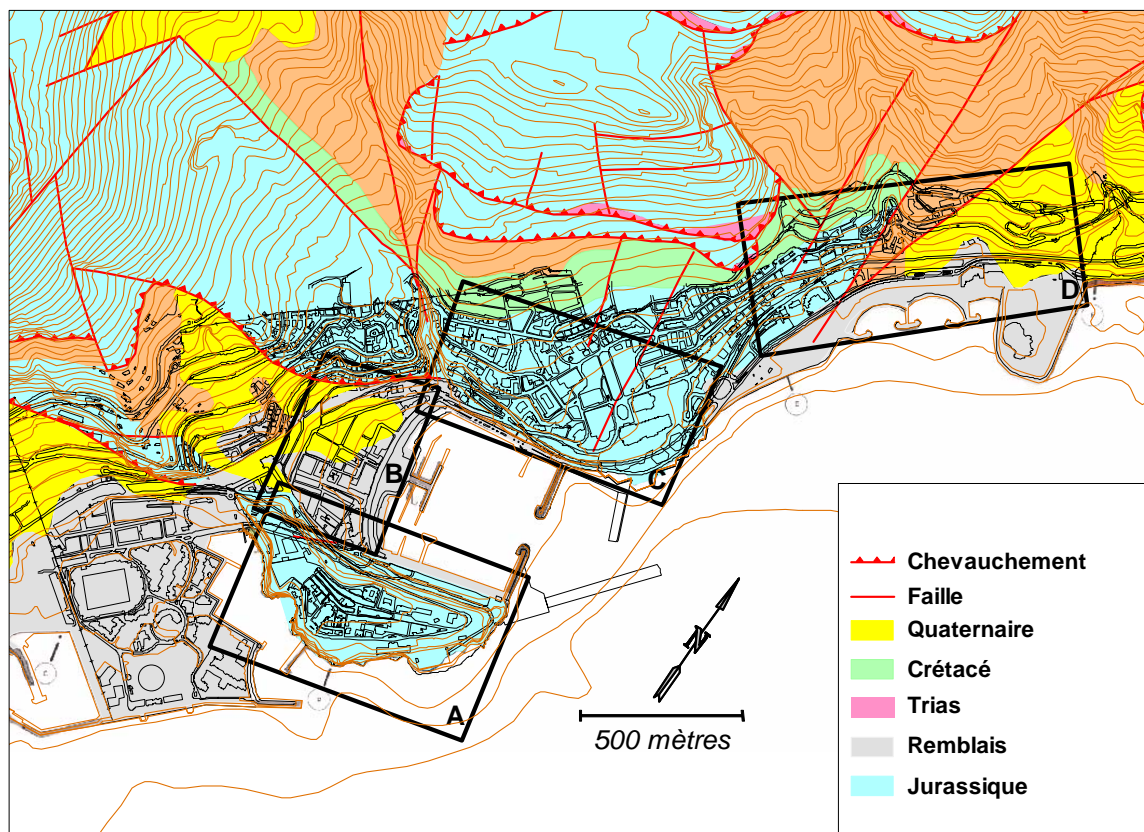


Figure 99 : Les 4 zones qui seront étudiées sur le plan annuaire 1887 reportées dans le contexte géologique et urbanistique actuel sur fond de carte topographique (DEUC).

5.4.1. Zone du Rocher, secteur A

Nous énumérons ici toutes les maisons qui ont nécessité des réparations sur la zone du Rocher, maisons individuelles, bâtiments de l'Etat et le Palais.

Les maisons les plus touchées sont :

- ⇒ rue des briques : 1 [c] ; 5 [q] ; 26 [o] ;
- ⇒ rue du milieu : 8 et 10 [d] ; 14 [e] ; 22 et 24 [k] ;
- ⇒ rue basse : 1 [q] ; 10 [l] ; 16 [m] ; 29 [n] ;
- ⇒ rue de l'Eglise : 4 et 6 [g]. ;
- ⇒ rue du Tribunal : 2 [b] ;
- ⇒ les deux maisons en face du chevet de la Cathédrale.[h] et [j] ;
- ⇒ la Chapelle de la Miséricorde [p] ;
- ⇒ le pensionnat des Dames de Saint Maur.

Sur le Rocher, la plupart des maisons présentent des dommages dont certains sont sérieux. La Commission des Travaux Publics a recommandé pour ces maisons des chaînages dont certains à tous les étages, des placements de tirants transversaux, des remaniements de toits et des réparations de cloisons. Cependant l'ensemble des maisons reste habitable, seules les deux maisons en face du chevet de la Cathédrale et la caserne des gardes ont été évacuées pour la réalisation d'importants travaux.

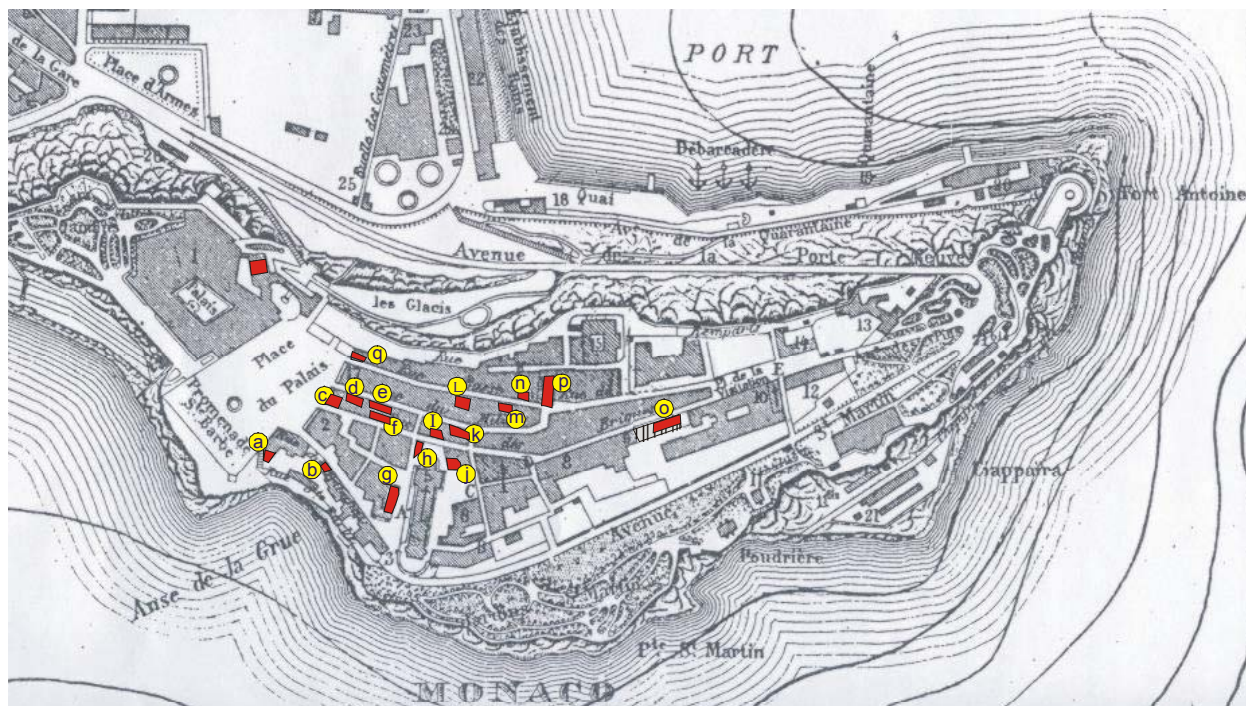


Figure 100 : Localisation, sur le plan annuaire 1887, des maisons endommagées sur le Rocher de Monaco.

Le Palais a lui aussi été touché, le rapport des visites du 25 février 1887 (**annexe 4**) témoigne avec précision des nombreux dégâts occasionnés par le tremblement de terre.

De nombreuses fissures plus ou moins importantes sont apparues dans de nombreuses pièces. Le rapport d'époque note que les dégâts croissent du sud au nord. C'est en effet la tour du pavillon et l'aile nord du Palais qui ont été le plus touchées. Des chaînages ont été réalisés dans la majorité des pièces de l'aile nord et cela sur les deux étages. Les plafonds ont été repensés et refaits. La tour du Pavillon lézardée a dû être chaînée sur ses quatre faces.

Le rapport mentionne toutefois que certains défauts de construction étaient déjà présents et ont rendu l'ensemble plus fragile aux secousses.

Dans les mois qui ont suivi cette secousse les réparations changeront l'aspect extérieur du Palais avec notamment une « reconstruction » de la tour Sud. La tour nord dite du pavillon perd sa dénomination puisque dorénavant le pavillon est hissé sur la nouvelle tour sud. Le nouvel ensemble architectural en pierre blanche de La Turbie, à l'entrée des petits quartiers qui bordent la tour du pavillon et de l'horloge, a été reconstruit quelques mois après le séisme.

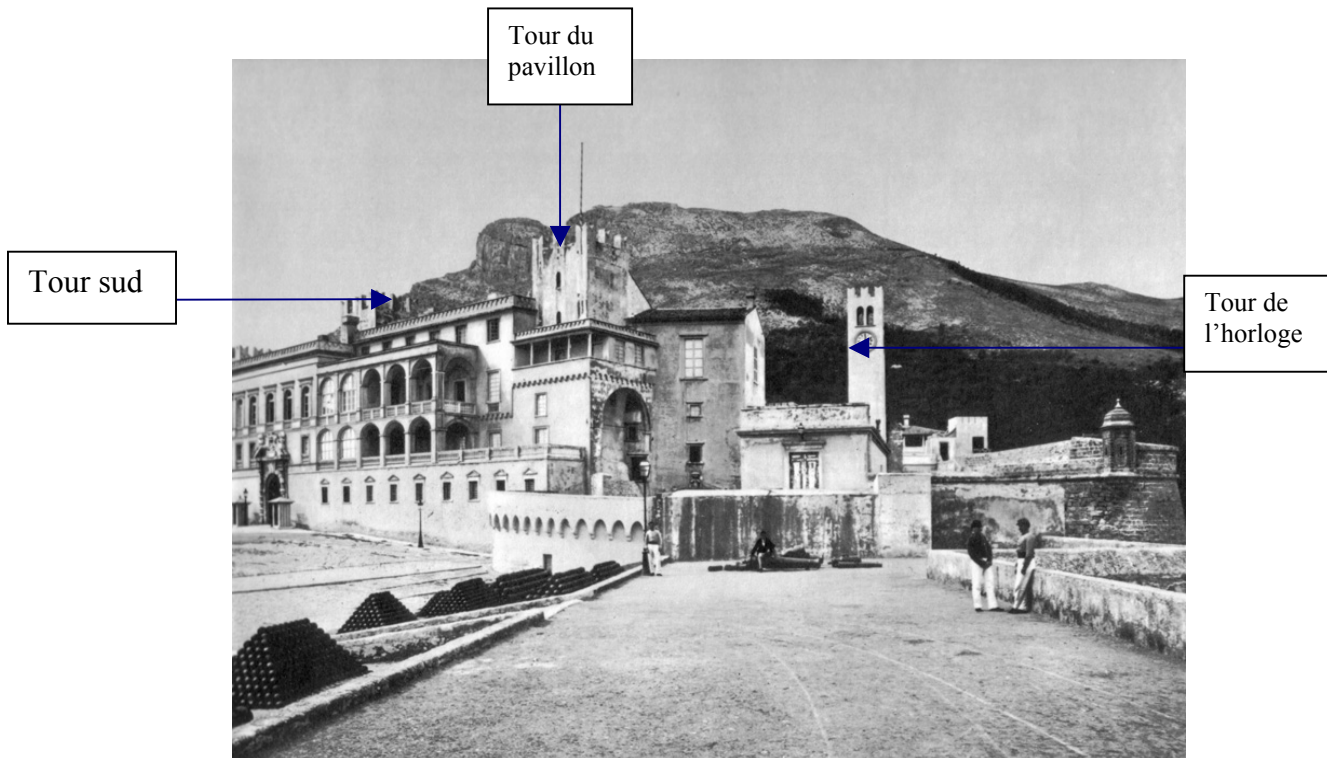


Figure 101 : Le Palais avant la secousse de 1887. La tour du pavillon et celle de l'horloge subiront, avec l'aile nord, les dégâts les plus importants.

5.4.2. Zone de La Condamine, secteur B

Les dégâts dans le quartier de la Condamine sont beaucoup moins importants, seule la maison Borghini au boulevard de la Condamine a été touchée. Le mur donnant sur la cour intérieure avait dû être chaîné sur plusieurs niveaux.

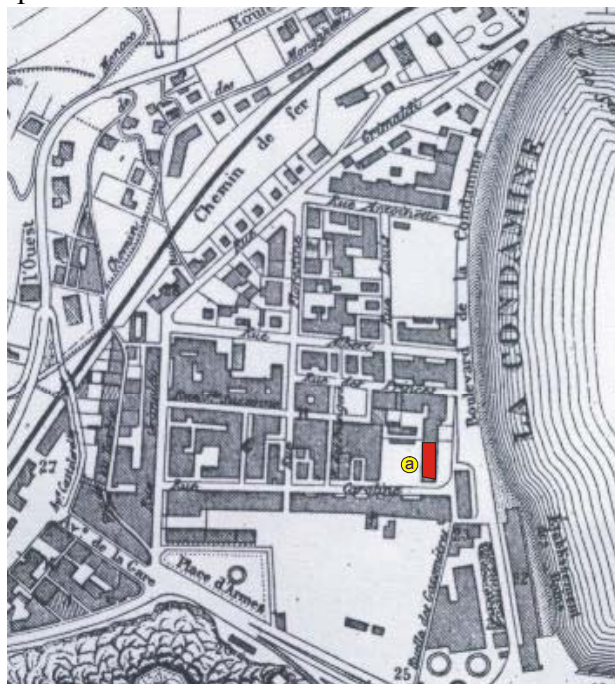


Figure 102 : Localisation des maisons endommagées dans le quartier de la Condamine, reportées sur le plan annuaire 1887.

5.4.3. Zone de Monte-Carlo, secteur C

- ⇒ boulevard Peirera (villa sans-souci) [a] ;
- ⇒ rue de la Scala et avenue de la Costa : (hôtel des Colonies) [b].

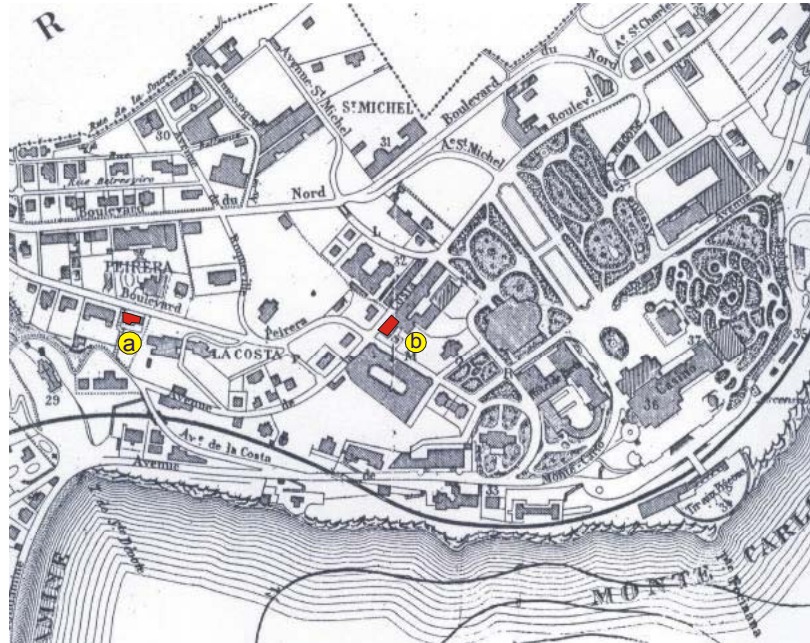


Figure 103 : Localisation des maisons endommagées à Monte-carlo (plan annuaire 1887)

L'occupation de la Villa sans-souci a été interdite jusqu'à ce que les réparations aient été effectuées. La toiture, les plafonds et les cloisons de l'hôtel des Colonies, devaient être réparés, et la portion de l'attique longeant l'avenue de la Costa démolie ou consolidée.

5.4.4. Zone de Saint-Roman, secteur D



Figure 104 : Localisation des maisons endommagées à Saint Roman (plan 1887)

La villa des Roses présentait, d'après la Commission des Travaux Publics, des dommages très graves. De ce fait, la maison avait dû être évacuée.

La maison Imperty présentait des dommages importants à réparer. Le rez-de-chaussée, le premier étage et les combles ont dû être chaînés, les fondations du mur sud reprises et les cloisons réparées.

La caserne des carabiniers de Saint Roman a été endommagée dans le mur sud et dans la cage d'escalier. L'étage a été évacué, et réoccupé après réparations.

5.5. Synthèse des dégâts observés et définition de l'intensité macrosismique

Dans cette synthèse des dégâts et dans l'évaluation de cette intensité macrosismique, les termes de quantité seront définis comme suit : quelques : 5% environ ; beaucoup ou nombreux : 50 % environ ; la plupart : 75 % environ.

C'est le Rocher de Monaco qui présente les dégâts les plus nombreux. Les autres quartiers ont été touchés par ce séisme mais dans une moindre mesure puisque juste quelques maisons ont souffert. Le quartier de la Condamine a été, proportionnellement au nombre d'habitation, moins touché que les autres quartiers.

Dans les secteurs de la Condamine, de Monte-Carlo, de Saint Roman ainsi que dans le secteur Est du Rocher de Monaco, la plupart des maisons avaient moins de trente ans lors du séisme de 1887. Elles ont le même nombre d'étages et la même méthode de construction que celles endommagées dans la vieille ville, cependant elles ont été bâties en une seule fois avec des matériaux forcément plus récents.

Les dégâts occasionnés au bâti ne font état d'aucune destruction, mais parfois de larges lézardes ont nécessité l'évacuation des bâtiments. Ils ne devaient pas cependant être trop sévères puisqu'ils ont pu, à l'époque, être réparés ou consolidés. Seules certaines parties du Palais ont été réparées, dans un premier temps, puis dans les mois qui suivirent reconstruites (tour sud et petits quartiers).

Sur le Rocher, comme le montre la répartition des dégâts sur la Figure 100, c'est la vieille ville reconstruite au XVI^{ème} siècle qui a été la plus touchée (zone comprise entre la place du Palais et la Mairie). Les bâtiments situés dans la partie Est du Rocher et qui ont moins de 30 ans d'âge (identiques au niveau de la date de construction à ceux des quartiers de La Condamine et de Monte-Carlo) n'ont pas été touchés, de même que la Cathédrale qui venait d'être édifiée au cœur de la vieille ville en 1874.

Ce sont les maisons les plus vétustes présentant des surélévations qui ont été principalement endommagées.

Pour essayer d'évaluer l'intensité macrosismique atteinte en Principauté lors de ce séisme, nous allons étudier les dégâts occasionnés aux types de constructions qui étaient présentes en 1887 en fonction du classement de l'échelle (EMS-98).

Chapitre 6 : Aléa local

Le bâti monégasque était composé de deux types de constructions :

- type A : constructions en pierre tout venant, moellon brut ;
- type B : constructions mixtes, maçonnerie - bois ; constructions en pierres taillées.

Pour la classification des dégâts aux bâtiments, nous avons volontairement gardé les termes d'endommagement de l'échelle MSK, mieux adaptés à notre avis à la description des dommages sur le bâti ancien. Rappelons qu'au niveau de cette classification les échelles MSK et EMS-98 ne diffèrent qu'au niveau de la terminologie employée. Les endommagements aux constructions peuvent être classés sous forme d'une échelle de degré :

- 1^{er} degré : dommages légers, fissuration de plâtres ; chutes de petits débits de plâtre ;
- 2^{ème} degré : dommages modérés : fissuration des murs ; chutes d'assez gros blocs de plâtre ; chutes de tuiles ; fissurations de cheminées ou chutes des parties de cheminées ;
- 3^{ème} degré : sérieux dommages ; lézardes larges et profondes dans les murs ; chutes de cheminées ;
- 4^{ème} degré : destructions : brèches dans les murs, effondrements partiels éventuels ; destruction de la solidarité entre parties différentes d'une construction ; destruction de remplissage ou de cloisons intérieures.

Les types de dégâts observés sur les constructions endommagées sont pour la plupart des lézardes assez larges, mais aucune destruction proprement dite. Nous considérons, par conséquent, que l'endommagement est du 2^{ème} degré sur la totalité de la Principauté avec dans quelques bâtiments des dégâts du 3^{ème} degré.

D'après le classement des intensités de l'échelle EMS-98 les deux niveaux qui pourraient correspondre sont le VI et le VII :

- VI : Dommages du 1^{er} degré dans quelques constructions du type B et dans de nombreuses constructions de type A. Dans quelques bâtiments de type A, dommages du 2^{ème} degré ;
- VII : Dans de nombreux bâtiments du type B, dommages du 2^{ème} degré. De nombreux bâtiments de type A sont endommagés au 3^{ème} degré et quelques uns au 4^{ème} degré.

L'analyse des dégâts occasionnés à ce type de constructions nous permet de redéfinir l'intensité macrosismique pour l'ensemble de la Principauté à VI-VII pour le séisme Ligure du 23 février 1887. Notons que si ce degré intermédiaire était souvent utilisé et visait à corriger une singularité dans la gradation de l'endommagement entre les degrés VI et VII de l'échelle MSK, il est conseillé dans l'échelle EMS-98 d'arrondir à la valeur inférieure et donc de proposer une intensité 6 EMS pour Monaco.

Cette analyse nous a permis de mettre en évidence les caractéristiques suivantes :

- tous les quartiers de la Principauté ont été touchés par ce séisme,
- aucune maison ne s'est écroulée,
- les dégâts les plus nombreux ont eut lieu sur le Rocher de Monaco dans la vieille ville, vraisemblablement à cause de la vétusté des maisons,
- les maisons véritablement endommagées (nécessitant une évacuation) sont relativement bien réparties sur la totalité du territoire,

- au regard de ces divers points aucun effet de site notable ne peut être affirmé et l'intensité macrosismique sur la Principauté peut être évaluée à 6 EMS.

6. Conclusion sur l'apport des nouveaux résultats au microzonage

Le traitement des nouveaux enregistrements sismiques et l'étude des dégâts occasionnés au bâti monégasque par le séisme du 23 février 1887 apportent plusieurs enseignements qui précisent le microzonage de Monaco :

- le Rocher de Monaco, présente une légère amplification plus faible que celle estimée par les calculs numériques qui était de 3 mais bien réelle contrairement aux résultats de la campagne de mesures réalisée en 1991 (CETE, 1992). De plus c'est la vieille ville dans le quartier du Rocher qui a été la plus touchée lors du séisme de 1887. Le facteur principal a sans doute été la vétusté des maisons mais on ne peut exclure qu'un léger effet de site ait aggravé le problème ;
- la zone de la Condamine ne présente aucune amplification pour les constructions qui reposent sur les terrains du Crétacé. Au niveau du microzonage, ces arguments instrumentaux et historiques (peu de dégâts) nous permettent de proposer d'englober la zone A3 de la Condamine dans la zone A0 qui comprend notamment les quartiers de Moneghetti et du Casino (Figure 74) ;
- la zone de Fontvieille : les nombreux enregistrements sismiques ont confirmé les résultats antérieurs notamment les instrumentaux (CETE, 1992). Nous les précisons toutefois au niveau de la gamme de fréquence qui s'étend de 1,5 hertz à 3 hertz avec une amplification de l'ordre de 6 à 10.
- sur l'ensemble de la Principauté : l'analyse précise des dégâts sur le bâti monégasque suite au séisme du 23 février 1887 nous a permis d'évaluer l'intensité macrosismique à 6 EMS.

7. Approche de l'aléa tsunami

La Principauté, de par sa position côtière et l'extension de son territoire en mer, semblerait être vulnérable à l'occurrence d'un éventuel tsunami. L'objectif de ce chapitre est d'apprécier l'aléa tsunami. Nous avons vu précédemment, que dans la région, il existe de nombreuses données instrumentales et historiques sur la sismologie. Les données concernant les tsunamis y sont beaucoup plus rares. Les données historiques dans notre région ne concernent que des mouvements de mer d'amplitude inférieure à 2 mètres. Les données instrumentales se limitent aux enregistrements de mouvements de mer suite au séisme Ligure de 1887 (Eva, 1997) et au microtsunami du 21 mai 2003, engendré par le séisme de Boumerdès, qui sera traité dans ce chapitre.

Concernant l'approche de cet aléa, nous distinguerons d'une part, les tsunamis engendrés par des glissements sous-marins qui peuvent avoir diverses origines (exemple celui de l'aéroport de Nice) et d'autre part, les tsunamis causés par des séismes majeurs ou explosions d'appareils volcaniques.

Nous détaillerons ensuite les enregistrements du microtsunami enregistré par le marégraphe de Monaco le 21 mai 2003 suite au séisme de Boumerdès en Algérie.

7.1. Les différents types de tsunamis qui pourraient atteindre Monaco

Pour Monaco, un éventuel tsunami peut avoir deux origines. Il peut être la conséquence d'un glissement sous marin ou être directement lié à un phénomène sismique ou volcanique majeur.

a) Les tsunamis engendrés par des glissements sous-marins

Un glissement de terrain sous-marin provient de l'effondrement d'un versant qui était en limite de stabilité. Cet équilibre peut être contrarié par de multiples causes.

- Tsunami de l'aéroport de Nice.

Le 16 octobre 1979, une partie de la plate forme de remblaiement de l'aéroport de Nice était emportée par un glissement sous-marin affectant les sédiments plio-quaternaires sur une épaisseur d'environ 20 m (Mulder, 1993). Après une baisse sensible du niveau de la mer, une vague estimée entre 2,5 et 3 mètres de hauteur a déferlé sur Antibes à 14h06, tuant une personne. Le cubage des sédiments éboulés a été estimé à 400 millions de m³ et les oscillations consécutives ont duré plus de 4 heures affectant le littoral sur un front de 100 km (Gennesaux, 1980).

A Nice, les volumes d'apports fluviaux sont importants, ils modifient les charges des versants sous-marins de l'embouchure du Var. Le 16 octobre 1979 c'est ce grand volume de sédiments probablement en limite de stabilité qui s'est effondré.

- Tsunami du 21 mai 2003

Le tsunami du 21 mai 2003, est similaire quant à sa cause au précédent. Seul le phénomène déclencheur est différent. Ici il s'agit du séisme de Boumerdès. L'importance de ce tsunami (vagues de 2 à 3 mètres à Palma de Majorque) dû à un séisme de magnitude 6.8 a surpris la communauté scientifique. Seuls des effondrements sous-marins de terrains instables, à l'origine de la rupture des câbles de communication, peuvent être à l'origine de ce tsunami (Hébert et Alasset, 2003).

b) Les tsunamis dévastateurs d'origine sismique ou volcanique

Ce sont les tsunamis qui présentent des vagues d'ordre métrique représentant un danger pour la population côtière.

- les tsunamis sismiques

Ces tsunamis nécessitent un séisme de magnitude supérieure à 7.5. Ils sont généralement associés à des mouvements verticaux du fond marin engendrés par le fonctionnement de failles normales ou inverses (cas du tsunami de Sumatra le 26 décembre 2004). Les séismes majeurs ont, en Méditerranée occidentale, une probabilité d'occurrence faible et semblent plutôt liés à des systèmes décrochants. Aucun tsunami dévastateur n'est connu historiquement en Méditerranée occidentale excepté celui de Messine en 1908 mais qui s'est limité à des effets locaux.

- les tsunamis volcaniques

Un des tsunamis historiques majeurs en Méditerranée est dû à l'explosion d'un édifice volcanique. Il s'agit du Santorin dans la mer Egée 1500 ans av. J.C. qui a déclenché un raz de marée qui a ravagé la côte septentrionale de la Crête. Les édifices volcaniques en activité qui pourraient présenter un risque en Méditerranée occidentale sont ceux d'Italie du sud dans la région de Naples ou des îles Eoliennes. Pour ces derniers la Corse et la Sardaigne constitueraient des protections assez efficaces contre l'arrivée de vagues destructrices sur Monaco.

7.2. Traitement du microtsunami enregistré à Monaco le 21 mai 2003.

Ces données ont été enregistrées sur des marégraphes Morse HT200 du SHOM avec un pas de temps de 10 minutes. Cette fréquence d'échantillonnage ne permet pas de faire des comparaisons fines entre les divers enregistrements. En effet, le décalage entre les temps d'arrivée des ondes sur les diverses stations (Ajaccio, Toulon, Nice et Monaco) et le pas de temps de la mesure ne permettent pas d'apprécier l'amplitude maximale atteinte par l'oscillation principale et interdisent toute comparaison d'un site à l'autre.

Un traitement a toutefois été appliqué pour présenter ce mouvement de mer anormal. C'est la même méthode de détermination que celle du système d'alerte sismique de Monaco qui a été utilisée. Le signal utile, c'est-à-dire le tsunami proprement dit, a été filtré du signal du marégraphe par la méthode SSA (**annexe 9**).

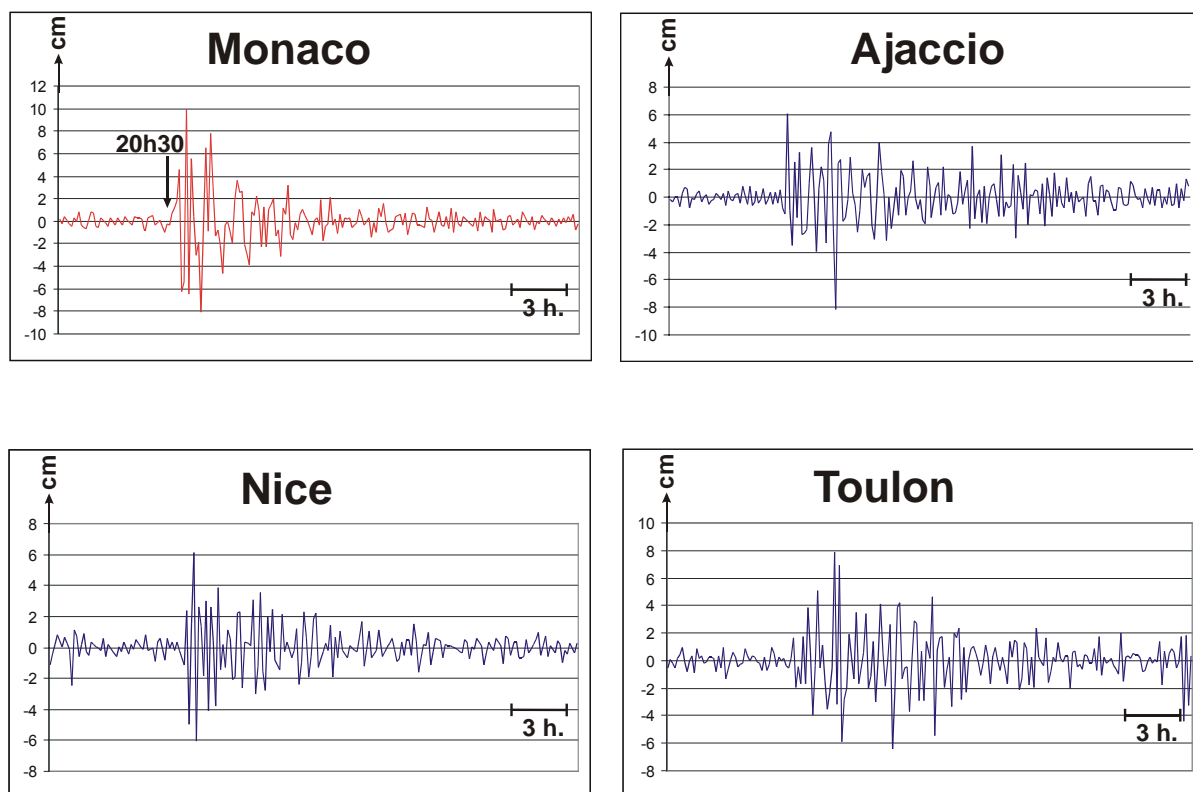


Figure 105 : Enregistrements le 21 mai 2003 du tsunami lié au séisme de Boumerdès par les marégraphes du SHOM situés sur les côtes de la mer Ligur.

Les premières oscillations anormales ont touché Monaco vers 20h30 TU soit environ 80 minutes après le séisme. Ce tsunami, qui a atteint une dizaine de centimètres sur les rivages de la mer Ligure, a été enregistré par les différents marégraphes dont celui de Monaco avec une amplitude de 10 cm. Les oscillations consécutives ont duré plus de 24 heures.

7.3. Les particularités de Monaco face au risque de tsunami

Nous avons vu que le risque d'un tsunami dévastateur en mer Ligure est improbable. Monaco pourrait-il être touché par une vague similaire à celle qui a touché Antibes lors du glissement sous-marin qui a emporté le remblais de l'aéroport de Nice ? Antibes fait face au versant Est sous-marin de l'embouchure du Var et présente un plateau continental plus développé qu'à Monaco. De plus le bassin versant monégasque limité aux premières crêtes a une superficie réduite et les apports terrigènes y sont très faibles. Ces quelques particularités mettent la Principauté à l'abri d'un phénomène similaire. Même si un glissement de terrain dans les sédiments jeunes accumulés sur le talus est possible, les mouvements de mer engendrés resteraient mineurs.

La bathymétrie des fonds sous-marins monégasques avec l'absence de plateau continental est plutôt favorable à la modération de cet aléa. En effet d'éventuelles ondes marines du tsunami à l'approche des côtes n'auraient pas le temps de dissiper leur énergie sous forme de vagues destructrices.

En conclusion, les arguments historiques, géographiques et bathymétriques nous permettent d'affirmer que l'aléa d'un tsunami dévastateur sur Monaco est très faible.

8. Poursuite des investigations

8.1. Développement du réseau de stations sismologiques

Aujourd'hui le développement du réseau de stations sismologiques s'oriente vers deux directions principales :

- un parc de stations vélocimétriques pour la mise à jour régulière du microzonage. Ce réseau est aujourd'hui composé de 5 stations dont deux fixes (sites du Rocher et de Fontvieille) et 3 autres mobiles sur le territoire de la Principauté.
- deux stations accélérométriques calibrées de manière à enregistrer des événements forts (saturation à 0,5 g.).

Le maintien et l'enrichissement du réseau de stations sismologiques peuvent être motivés pour diverses raisons :

- la mise à jour régulière du microzonage sismique de la Principauté en fonction de son développement urbanistique. Certaines études (Gueguen, 2000) indiquent que la présence de bâtiments de taille importante en grand nombre et avec une forte densité d'implantation, est susceptible de modifier significativement le signal sismique par rapport à celui que l'on observerait dans une zone non bâtie.

- l'installation d'une station sismologique sous-marine en limite des eaux territoriales de Monaco permettrait de bien contraindre les séismes localisés en pied de talus.
- la définition d'une loi d'atténuation monégasque issue d'un grand nombre d'enregistrements permettrait d'apprécier plus précisément les vitesses et les accélérations maximales qui pourraient être engendrées par un séisme hypothétique.
- l'application de la fonction de Green empirique à de nombreux « petits séismes » nous permettra de connaître, pour des magnitudes plus fortes, les caractéristiques de leur mouvement sur Monaco.

8.2. Mise au point d'un marégraphe couplé au système d'alerte sismique.

L'objectif de ce marégraphe serait d'étudier plus précisément les variations anormales du niveau marin du type de celles du micro tsunami de Boumerdès par exemple.

Le système d'alerte sismique de Monaco donne depuis plusieurs années entière satisfaction, la méthodologie employée pour la détection fine des variations du niveau de la mer serait la même que celle de ce système. Elle a été expérimentée avec succès sur les données du micro-tsunami de Boumerdès.

A terme, les deux systèmes pourront être couplés. De ce fait, lors d'une variation brutale du niveau marin une alerte pourrait être envoyée durant les 2 heures qui suivent l'occurrence d'un séisme.

8.3. Bâti actuel et vulnérabilité – les actions

Comme nous l'avons vu, la vétusté des bâtiments joue un rôle majeur au niveau de la vulnérabilité du bâtiment à l'agression sismique. Il est donc nécessaire de réaliser une image actuelle du bâti de la Principauté en fonction de l'âge mais aussi des grands procédés de construction.

Cette image actuelle n'est pas représentative du nombre de logements mais juste de l'emprise au sol des bâtiments ou de blocs de bâtiments. Cette investigation ne permet pas de déterminer les pourcentages de logements compris dans chacune de ces catégories. Cela relèverait plutôt d'une étude de scénario catastrophe à l'image de ce qui a été fait dans le cadre de RISK-UE (Mouroux, 2003) ou de GEMGEP (2005). Certaines tendances peuvent se dégager et être utiles dans le pré-diagnostic de l'état et donc de la vulnérabilité du bâti monégasque à l'agression sismique.

- Les bâtiments construits uniquement en maçonnerie représentent plus de la moitié de la surface occupée au sol. Les deux quartiers principaux sont comme nous l'avons vu le Rocher de Monaco et celui de la Condamine auxquels peuvent se rajouter le quartier du Jardin Exotique, de Plati et de celui de Monégghetti et dans une moindre mesure celui de Monte-Carlo et de Saint Roman.
- La quasi totalité des maisons construites en front de mer sont récentes et présentent, de ce fait, toutes des dispositions parasismiques.

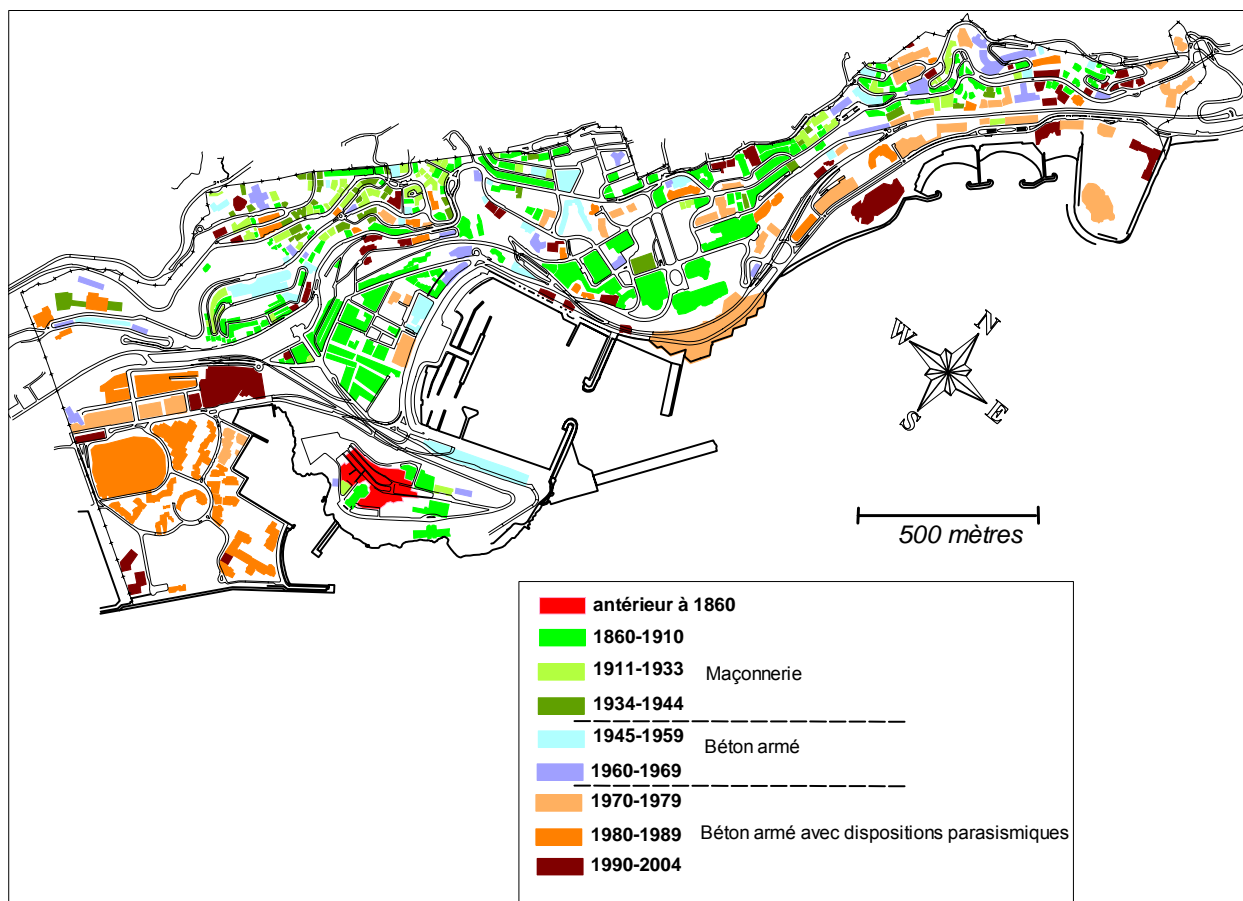


Figure 106 : Plan de Monaco avec les bâtiments ou blocs de bâtiments représentés par périodes et par procédés de construction : vert : maçonnerie; bleu : béton armé; marron orangé : béton armé avec dispositions parasismiques. Chacune de ces grandes périodes a été subdivisée en plusieurs catégories (nuances de la couleur) afin de tenir compte de l'âge et donc de la vétusté du bâti (Sources : DPEU – DEUC).

Les terrains en Principauté les plus pénalisants au niveau de la vibration sismique sont les terrains anthropiques formés de matériaux hétérogènes d'origines variées (page 148). Tous les bâtiments sur ces terrains sont construits suivant les normes parasismiques. Si les meilleures précautions sont prises pour ces bâtiments, il n'en est pas de même pour les bâtiments les plus anciens. Ces derniers sont construits généralement sur des terrains au comportement plus favorable à la sollicitation sismique. Il nous semble nécessaire actuellement, sans diminuer notre effort au niveau de l'application des règles parasismiques, de s'occuper du bâti ancien, qui de par la vétusté, est rendu vulnérable à l'agression sismique.

Lors d'un séisme majeur pour le bâti ancien, la distribution des dommages dépend de l'aléa local mais aussi d'autres facteurs de nature structurelle : type de sol porteur, type de fondation, distribution de murs porteurs, présence ou non de chaînage, type de charpente, distributions des ouvertures, surélévations ...

Un bâtiment peut apparaître bien entretenu car une attention a été portée uniquement à la préservation de son apparence esthétique, plâtre récent et belles peintures ne signifient pas que le système structural du bâtiment est également en bon état (EMS-98).

Ainsi il serait nécessaire de porter une attention toute particulière à la vieille ville sur le Rocher pour plusieurs raisons :

- la plupart des bâtiments ont déjà souffert lors du séisme de 1887 ;
- ils ont depuis subi plusieurs surélévations décalées dans le temps ;
- l'attrait touristique des ruelles du Rocher a induit des aménagements en rez-de-chaussée tels que l'augmentation des surfaces de vitrine. Celles-ci introduisent des « transparences » toujours néfastes, qui contribuent notablement à l'augmentation de la vulnérabilité. En effet les bâtiments anciens à rez-de-chaussée commercial, caractérisés par des transparences importantes (50% de la surface contre 25% dans les étages supérieurs) présentent une vulnérabilité majorée de 20% par rapport aux bâtiments anciens normaux (GEMGEP, 2005) ;
- d'éventuels dégâts des eaux ont pu favoriser le pourrissement des poutres transverses en bois qui soutiennent les planchers et fragilisent l'ensemble.

Un exemple de réhabilitation « radicale » sur le Rocher de Monaco concerne l'immeuble situé à l'angle de la rue de Vedel et de la rue Emile de Loth. Cet immeuble a été détruit et reconstruit dans le même style mais avec des dispositions parasismiques. Pour une surface de plancher de 63 m², c'est plus de 12 m² par niveau qui ont pu être gagnés sans pour autant augmenter l'emprise du bâtiment au sol. Cette réhabilitation présente deux intérêts :

- un intérêt au niveau de la vulnérabilité puisqu'il a été complètement détruit et reconstruit avec des dispositions parasismiques en reproduisant à l'identique le cachet extérieur de l'immeuble précédent ;
- un intérêt économique, avec un gain en m² non négligeable.

Cet exemple prouve qu'il serait bon de favoriser ce genre de réhabilitation du fait de son intérêt sécuritaire mais aussi économique. Notons toutefois qu'il serait préférable de traiter l'ensemble du pâti de maisons afin que lors de la sollicitation sismique la période propre d'oscillation de toutes les maisons soit identique. Sans pour autant atteindre ce choix extrême qui ferait perdre le « cachet » du vieux Monaco, il existe des dispositions constructives d'aménagements permettant de diminuer la vulnérabilité des bâtiments.

Dans le cadre d'une réhabilitation, les modifications apportées aux bâtiments anciens devraient leur assurer un meilleur comportement à l'action sismique. Si l'on consolide les éléments horizontaux en remplaçant les planchers ou en insérant des éléments de liaisons, la performance est améliorée. Si en outre on applique des injections de mortier ou d'époxy ou un chemisage de béton armé, les performances peuvent atteindre les classes attribuées aux bâtiments ayant une conception parasismique (EMS-98).

Cette classification globale (Figure 106) mériterait – elle d'être affinée à l'image de ce qui a été réalisé dans le cadre du projet RISK-UE (Mouroux, 2003) pour Nice, à savoir la définition de typologies constructives différentes (17 catégories différentes : 7 pour la maçonnerie, 6 pour le béton armé, 3 pour l'acier et 1 pour le bois) ?

Une classification plus précise ne semble pas nécessaire dans le contexte urbanistique de la Principauté pour deux raisons :

- Monaco a une petite superficie de 2 km². La politique d'urbanisation actuelle va, sans que ce soit l'objectif premier, dans le sens d'une diminution du risque avec le

remplacement de certains quartiers entiers par des immeubles modernes présentant des dispositions parasismiques.

- Les quartiers les plus anciens qui font l'objet d'une protection au niveau du règlement d'urbanisme sont bien connus et mériteraient de toute manière une attention toute particulière en fonction de leur ancienneté.

C'est pour ces diverses raisons que sans pour autant s'étendre dans une étude du style GEM-GEP (2005) à Nice, il nous paraît utile de lancer une réflexion sur l'adaptation du bâti ancien aux normes parasismiques (sortie prévue fin 2005) ou sur sa réhabilitation éventuelle.

Une telle réflexion permettrait :

- l'identification des courbes de vulnérabilité spécifiques au contexte monégasque (plus adaptées que celles des échelles MSK-EMS) afin de combiner des cartes d'aléa local avec des courbes de vulnérabilité du bâti ancien pour obtenir des cartes de risques de dommages ;
- le renforcement des structures de cette époque en s'appuyant sur l'analyse des zones typiquement endommagées.

CHAPITRE 7 : CONCLUSIONS

1. Les avancées sur la connaissance de l'aléa sismique sur Monaco

Le gouvernement monégasque a toujours été très concerné par le risque sismique et a, depuis les années 1970, œuvré pour contribuer à sa diminution notamment par l'application de la réglementation parasismique aux bâtiments nouvellement construits. C'est au cours d'une réunion interne sur la modification de la réglementation parasismique en 1996 qu'est apparue, aux responsables politiques, la nécessité d'argumenter le choix d'un séisme de référence à prendre en compte pour l'application des normes parasismiques.

L'étude sur la contribution à la connaissance de l'aléa sismique en Principauté de Monaco était donc lancée en collaboration avec l'Université et le CETE de Nice. Les résultats de celle-ci devaient confirmer ou infirmer l'hypothèse du séisme de référence actuellement pris en compte pour la réglementation parasismique à savoir un séisme de magnitude 6.5 à 30 km de distance.

Pour arriver à cet objectif cette étude allait s'articuler autour de plusieurs domaines relevant de la connaissance de l'aléa régional :

- une synthèse de l'état des connaissances en matière de paléotectonique et de tectonique active régionale et locale aboutissant à un certain nombre de questions qui ont orienté l'étude ;
- une analyse géomatique de la déformation fragile finie révélant un certain nombre d'accidents, dont certains non répertoriés dans la littérature scientifique ;
- une analyse structurale, microstructurale et sismotectonique autour de Monaco définissant les champs de déformations à partir de l'observation des miroirs de failles présents autour des accidents principaux, ainsi que les états de contraintes actuels déduits de l'analyse des mécanismes au foyer des séismes principaux ;
- l'application des lois d'atténuations à la sismicité historique et instrumentale régionale, la définition de zones sismogènes, l'analyse d'un certain nombre de séismes hypothétiques aboutissant à la détermination des caractéristiques du séisme de référence à prendre en compte en Principauté.

Dans la suite logique de ces résultats nous avons apporté des éléments nouveaux à la connaissance de l'aléa local avec notamment :

- l'analyse des rapports d'époque sur les dégâts portés au bâti monégasque lors du séisme Ligure de 1887,
- l'exploitation des enregistrements récents de séismes significatifs à Monaco.

La présentation d'arguments scientifiques aux décideurs monégasques avait pour objectif de leur faire apprécier ce risque sismique au niveau de l'urbanisation mais aussi de la protection civile. Ainsi, en connaissance de cause pourront-ils prendre les décisions politiques qu'ils jugeront nécessaires.

Chapitre 7 : Conclusions

Les principaux résultats de cette étude sont sommairement rappelés ci-après :

- L'analyse des traitements d'images satellitaires et M.N.T a mis en évidence un certain nombre d'accidents qui marquaient fortement la morphologie. Certains, inconnus, comme l'accident N100°E du col Saint Michel – Sospel, (20 km de longueur en surface et distant de 16 km) pourrait, si de la sismicité même faible lui était attribué, présenter un risque pour Monaco en devenant la faille active majeure de la région ;
- Les 3 séismes dans le domaine terrestre qui ont présenté ces vingt dernières années les magnitudes les plus importantes autour de Monaco, ceux d'octobre 83, de décembre 2000 et du 21 avril 1995, ont mis en évidence des plans de failles actifs de directions N100-110°E. Ils montrent la nécessité de surveiller la sismicité aux abords des principaux accidents de cette même direction mis en évidence lors de l'analyse géomatique (chapitre 3) ;
- Un changement récent de la dynamique dans notre région. La paléodéformation fragile finie présente des champs de déformations avec des raccourcissements variant autour de la direction nord-sud, alors que l'état de contrainte actuel est extensif suivant une direction Sud Ouest – Nord Est. Ce changement de dynamique peut expliquer l'apparition de nouveaux accidents ou la remobilisation d'anciens qui avaient été gommés du paysage par la structuration de l'arc de Nice.
- La Principauté se trouve à la frontière de deux domaines structuraux, à terre puisque située sur la limite orientale de l'arc de Nice et en mer par la jonction de deux domaines distincts présentant des orientations de vallées sous-marines respectivement de N140°E et NS. Monaco se trouve également en limite de deux domaines présentant des états de contrainte différents ;
- La corrélation entre les séismes et les failles géologiques n'est jamais évidente pour des raisons qui sont liées aux incertitudes de localisation des épicentres et aussi à la méconnaissance de la position des failles actives. Nous avons confirmé que la sismicité se répartit le long des grands couloirs de failles N120-140°E, N40°E et N160-170°E et plus encore au niveau de leurs intersections, mais aussi comme nous l'avons mis en évidence par la sismologie et l'analyse géomatique, le long d'accidents de directions N100-110°E ;
- Nous avons montré que les valeurs de vitesses et d'accélération calculées par les lois classiques d'atténuation étaient en général surestimées par rapport à celles mesurées ;
- Les zones sismogènes entourant Monaco sont au nombre de 3 :
 - o une zone dans l'arrière pays entre 10 et 30 km,
 - o une zone en mer Ligure à une trentaine de km au large,
 - o une zone à l'est entre 70 et 120 km environ.
- Au niveau de l'aléa local, nous avons pu démontrer que, grâce aux nouvelles mesures instrumentales et à l'analyse de la répartition des dommages dans la Principauté lors du séisme de 1887, le mouvement sismique sur l'ensemble de la Principauté est assez homogène pour les zones naturelles. Les amplifications sur les terrains anthropiques présentent un rapport de 6 à 10 pour des fréquences comprises entre 1,5 et 3 hertz.
- Concernant la sismicité historique nous relevons que seul le séisme de 1887 a sensiblement touché la Principauté. L'étude macrosismique réalisée à partir de documents d'archives nous a permis de déterminer une intensité 6 EMS-98 sur l'ensemble de la Principauté. Les résultats de cette étude pourraient inciter les pouvoirs publics à s'intéresser aux possibilités de réhabilitation du bâti ancien qui a été affecté par ce séisme.

Ces différents résultats nous montrent que l'actuel séisme de référence pris en compte actuellement est le plus pénalisant de l'ensemble des séismes hypothétiques proposés. Tous les arguments scientifiques développés dans cette étude vont dans ce sens. Si ce constat est plutôt rassurant nous pensons qu'en vertu du principe de précaution, ces paramètres (Magnitude 6.5 à une distance de 30 km) doivent être conservés pour l'application de la réglementation parasismique à Monaco.

2. Approche du risque sismique à Monaco : limites et perspectives

Dans notre zone de sismicité moyenne la géologie de surface n'apporte que très rarement des renseignements sur les failles actives et la sismicité instrumentale est trop jeune (moins de 50 ans) pour nous aider à déterminer avec précision leurs emplacements.

Le progrès de la sismicité instrumentale avec l'augmentation de la densité des réseaux permet d'espérer que dans les prochaines années les séismes seront localisés précisément et leurs plans de failles identifiés aisément. Depuis 10 ans, seuls deux séismes dans le domaine terrestre ont bien été contraints. Le meilleur exemple est la crise sismique de Blausasc qui est l'événement sismique le mieux enregistré de la région puisqu'il a eu lieu durant la campagne sismologique SALAM où un réseau très dense de stations sismologiques avait été installé.

Le fait de se trouver dans cette zone de sismicité moyenne, aux accidents actifs difficiles à mettre en évidence par des méthodes classiques, doit nous encourager à explorer d'autres pistes telles que celles exploitées dans ce travail : l'analyse géomatique compilée avec les techniques plus classiques. Les évolutions de la technologie (capteur embarqué sur les satellites toujours plus performants) avec les traitements morphologiques toujours plus adaptés permettront de mettre en exergue plus facilement les accidents potentiellement actifs.

3. Réflexion finale sur la Principauté de Monaco face au risque sismique

Cette étude a amélioré la connaissance de l'aléa sismique en Principauté et la compréhension globale du jeu et de l'agencement des failles actives. Dans notre région à sismicité modérée, chaque nouveau séisme apporte sa contribution, souvent surprenante, à la compréhension du fonctionnement cinématique de notre région.

La précision des calculs du génie parasismique présente un décalage avec les incertitudes du phénomène physique qui entourent le séisme et sur lesquels ces calculs reposent. Alain Pecker, président d'honneur de l'Association Française de génie parasismique, écrit à ce sujet : « de bonnes mesures constructives, qui relèvent souvent du simple bon sens de l'ingénieur, sont préférables aux calculs les plus sophistiqués » (préface de l'ouvrage de Betbeder-Matibet, 2003). C'est pour cette raison que parallèlement à l'application de ces règles il est indispensable de poursuivre l'effort entrepris dans cette étude pour améliorer la connaissance de l'aléa sismique en Principauté de Monaco.

Ainsi, cette étude qui a actualisé la connaissance de l'aléa sismique à Monaco à un instant donné ne doit pas être considérée comme une fin en soi. Du fait que la priorité restera toujours de disposer d'un parc immobilier adapté au mouvement sismique, de nombreuses études doivent continuer et se développer sur des nouveaux axes de recherches comme nous l'avons démontré :

- les analyses géomatiques doivent se poursuivre parallèlement à l'avancée de la technologie des capteurs,
- le réseau monégasque de stations sismologiques doit être pérennisé et enrichi,
- la sensibilisation de la population surtout dans une zone de sismicité moyenne doit être encouragée pour que ce risque bien réel soit connu par tous, et pour que *in fine* la population elle-même participe à la diminution de ce risque,
- des études du renforcement du bâti affecté par le secousse de 1887 devraient être lancées.

Cette étude a apporté des éléments concrets pour que les responsables chargés de la politique de l'urbanisation puissent disposer d'un document scientifique leur permettant d'étayer le choix de l'hypothèse du séisme de référence à prendre en compte à Monaco.

Monaco est un des Etats au monde situés dans une zone de sismicité moyenne qui est exemplaire au niveau de sa considération du risque sismique :

- c'est l'un des premiers états européens à avoir appliqué les normes parasismiques à l'ensemble de ses bâtiments dès les années 1960,
- un microzonage a été réalisé sur l'ensemble de son territoire dès 1991,
- le Gouvernement a mené une politique forte en faveur de la sensibilisation de la population et des autorités (programme SESAM et système d'alerte sismique),
- la réalisation de cette étude présentant des résultats précis et évolutifs sur l'aléa sismique de la Principauté en est la preuve.

BIBLIOGRAPHIE

-A-

- Aki K., Richards P.-G., 1980.** Quantitative seismology : theory and methods. W.H. Freeman & Co.
- Aki K., 1993.** Local site effects on weak and strong ground motion. *Tectonophysics*, 218 p. 93-111.
- Ambraseys N., 1995.** The prediction of earthquake peak ground acceleration in Europe. *Earth. Eng. Struct. Deyn*, Vol 24.
- Amelung F. et King G., 1997.** Large-scale tectonic deformation inferred from small earthquakes, *Nature*, 386, p. 702-705
- Angelier J. et Mechler P., 1977.** Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en séismologie : la méthode des dièdres droits. *Bull. soc. Géol. Fr.* 7 19-6. p. 1309-1318.
- Angelier J., Slunga R., Bergerat F., Stefansson R., Homberg C., 2004.** Perturbation of stress and oceanic rift extension across transform faults shown by earthquake focal mechanisms in Iceland, *earth planet. Sci. Lett.*, 219, p. 271-284.
- Arlegui L.-E., Soriano M.-A., 1998.** Characterizing lineaments from satellite images and field studies in the central Ebro basin (NE Spain).
- Ashford S.-A. et Sitar N., 1997.** Seismic response of steep natural slopes, report No UCB/EERC 94-05 Earthquake Engineering Research Center, Collège of Engineering University of California at Berkeley.

-B-

- Bard P.-Y., 1985.** Les effets de site d'origine structurale : Principaux résultats expérimentaux et théoriques. p. 223-238 dans *Génie Parasismique* (V. Davidovici). Presse de l'école nationale des ponts et chaussées.
- Bard P.-Y. et Meneroud J.-P., 1987.** Modification de signal sismique par la topographie. Cas de la Roya (Alpes-Maritimes, France). *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, Vol N 150-151. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France, 1987.
- Bard P.-Y., 1994.** Effects of surface geology on ground motion : recent results and remaining issues. In *proc. Tenth Eur. Conf. On Earthquake engineering*, Vienna, Austria.
- Bard P.-Y., 1995.** Acquisition de moyens de reference et de données pour la validation d'ouvrages de genie civil en zone sismique, compte rendu final. 90.F.0792. Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique- juillet 1995.
- Baroux E., Bethoux N., Bellier O., 2001.** Analyses of the stress field in southeastern France from earthquake focal mechanisms "*Geophysical Journal International*" 145 : p. 336-348.
- Betbeder-Matibet J., Bour M. 2002.** Lois d'atténuation pour les valeurs de pic du mouvement (accélération, vitesse, déplacement) et d'ordonnées spectrales. *Cahier technique AFPS n°23*. p. 24-51.
- Betbeder-Matibet J., 2003.** Risques et aléas sismiques, Hermès, Paris, 2003.
- Betbeder-Matibet J., 2003.** Prévention parasismique, Hermès, Paris, 2003.

Bethoux N., Fréchet J., Guyoton F., Thouvenot F., Catteneo M., Eva C., Nicolas M., Granet M., 1992. A closing Ligurian Sea? *Pageoph*, vol 139, n° 2, p. 179-194.

Bigot-Cormier F., 2000. Dénudation différentielle du massif cristallin externe alpin de l'Argentera (sud-est de la France) révélées par thermochronologie traces de fission (apatites, zircon) *C.R. Acad. Sci. Paris/Earth and planetary sciences* 330, p. 363--370.

Bosio U., 1902. La province des Alpes-Maritimes, anciens comtés de de Nice, Vintimille et Tende, Baronne de Bueil, Principauté de Monaco, Paris, Imp. Des Alpes-Maritimes.

Bossolasco M., Eva C., 1965. Il terremoto del 19 luglio 1963 con epicentro nel Mare Ligure. *Geofis. et Meteor.*, XIV, p.80-88.

Bourrian, J.-L., 1988. Compilations d'anomalies météorologiques et autres catastrophes de 1094 à 1985. Bulletin de la Commission Météorologique – centre départemental Météorologique Nice Côte d'Azur.

Brambati A., Faccioli E., Carulli E.-B., Culchi F., Onofri R., Stefanini S., Ulcigrai F., 1980. Studio de microzonizzazione sismica dell'area di Tarcento (Friuli) Edito da Regiona Autonoma Friuli-Venezia-Giulia.

BRGM, 1996. Base NEOPAL (néotectonique et paléosismicité) : bilan des travaux 1996. Rapport BRGM, R39081. p. 31.

Bulard P.-F., Chamagne B., Dardeau G., Delteil J., Gioan P., Ivaldi J.-P., Laval F., Perez J.-L., Polvêche J., 1975. Sur la genèse et les structures de l'arc de Nice – extrait du Bull. Soc. Géol. Fr, p. 129.

-C-

Cadiot B., 1979. « Le séisme nissard de 1564 » dans l'ouvrage : les tremblements de terre en France par Jean Vogt. Mémoire du BRGM n°96. p. 174-178

Calais E., Galisson L., Stéphan J.-F., Delteil J., Deverchère J., Larroque C., Mercier de Lépinay B., Popoff M., Sosson M., 2000. Crustal strain in the Southern Alps, France, 1948-1998 *Tectonophysics* (319) 1, p. 1-17.

Calais E., Nocquet J.-M., Jouanne F., Tardy M., 2002. Current extension in the central part of the western Alps from continuous GPS measurements, 1996-2001. *Geology*, 30-7, p. 651-654.

Campredon R., Franco, M., Giannerini, G., Gigot, P., Irr, T., Lanteaume, M., Tapoul J., 1977. Les déformations des conglomérats pliocènes de l'arc de Nice (chaînes subalpines méridionales) : *C.R. Somm. Soc. Geol. France*, 2. p. 75-77.

Canestrier P., 1930. "Roccasparviera village tragique" Bibliothèque municipale de Nice. PL 6506. 24 p.

Cansi Y., Bethoux N., 1985. T waves with long inland paths: synthetic seismograms. *Journal of geophysical research*, vol. 90, NO. B7, p. 5459-5465.

Carrère V., 1990. Development of multiple source data processing for structural analysis at a regional scale. *Photogramm. Engineer. Remote sensing*, LVI, 5, p. 587-595.

Carey-Gailhardis, E et Mercier, J.-L., 1987. A numerical method for determining the state of stress using focal mechanisms of earthquake populations: application to Tibetan teleseisms and microseismicity of southern Peru, *Earth planet. Sci. Lett.* 82, P. 165-179.

Carey-Gailhardis, E et Mercier, J.-L., 1992. Regional state of stress, fault kinematics and adjustments of blocks in a fractured body of rock: application to the microseismicity of the Rhine Graben, *J. Struct. Geol.*, 14 (8/9), P. 1007-1017.

Chaumillon E., Deverchère J., Réhault J-P., Gueguen E., 1994. Réactivation tectonique et flexure de la marge continentale Ligure (Méditerranée Occidentale) C.R. Acad. Sci. Paris, 319, p. 675-682.

CETE, 1992. Microzonage sismique de la Principauté de Monaco. Rapport au département des Travaux Publics du gouvernement monégasque, CETE Méditerranée, Nice, France, mars 1992.

CETE, 1996. Reglementation parasismique, note au Service des Travaux publics de Monaco du 16 octobre 1996. TP96.6643. 9 p.

Charreau J., 2002. Déformations actuelles dans l'arc de Nice : caractérisation des structures actives par approche combinée tectonique – géomorphologie - sismotectonique. D.E.A. Dynamique de la lithosphère, des marges océaniques aux chaînes de montagne. Université de Nice – Sophia Antipolis.

Chorowicz J., 1980. Mise à jour des notions utilisées par les géologues en télédétection C. R. Somm. Société géologique de France, 5 p. 203-206.

Chorowicz J., Deroin J.-P., 2003. La télédétection et la cartographie géomorphologique et géologique. Collection Géosciences. 141 p.

Clauzon G., 1999. L'impact des variations eustatiques du bassin de Méditerranée occidentale sur l'orogène alpin depuis 20 Ma - Et. Géogr. Phys., n° XXVIII, p. 33-40.

Cosani L., 1996. Néotectonique et héritage structural entre massif du Mercantour et marge Ligure : le secteur de Saorge-Taggia (DEA) Géologie Alpine 73 : p. 128-134.

Courboux F., Deschamps A., Cattaneo M., Costi F., Déverchère J., Virieux J., Augliera P., Lanza V., Spallarossa D., 1998. Source study and tectonic implications of the 1995 ventimiglia (border of Italy and France) earthquake (ML = 4.7) Tectonophysics 290 : p. 245-257.

Courboux F., Duval A.-M., Deschamps A., Lomax A., Larroque C., 2001. Les enseignements du petit séisme de Peille (Alpes-Maritimes. France) CR. Acad. Sci. Paris, 333, p. 105-112.

Courboux F., Deschamps A., Castello B., Stephan J.-F., Charreau J., 2002. New insights for active tectonics in Nice Area (south of France) from the results of the seismological SALAM experiment (2000-2001) congrès EGS.

Courboux F., Larroque C., Deschamps A., Gelis C., Charreau J., Stephan J.-F., 2003. An unknown active fault revealed by microseismicity in the south-east of France. Geophys. Res. Lett., 30 (15), 1782, doi : 10.1029/2003GL017171.

Courboux F., Larroque C., Gelis C., Deschamps A., Sansorny C., Got J.-L., Charreau J., Stephan J.-F., Bethoux N., Virieux J., Brunel D., Maron C., Duval A.-M., Vidal S., Perez J.-L., Mondielli P., 2005. Seismic hazard on the French Riviera: new data, interpretations and simulations. *To be submitted to geophysical Journal International.*

-D-

Dadou C., Godefroy P., Vagneron J.-M., 1984. série document B.R.G.M., n°59, 1984, 246 p.

Dardeau G., 1983. Le jurassique des Alpes-Maritimes (France) stratigraphie, paléogéographie, évolution du contexte structural à la jonction des dispositifs Dauphinois, Briançonnais et Provençal. Thèse de l'université de Nice.

Dardeau G., 1987. Inversion du style tectonique et permanence des unités structurales dans l'histoire mésozoïque et alpine du bassin des Alpes Maritimes, partie de l'ancienne marge passive de la Téthys C.R. Acad. Sci. Paris, t 305 sér. II p. 483-486.

Dardeau G., 1988. Tethyan evolution and alpine reactivation of Jurassic extensional structures in the French Alpes Maritimes Bull. soc. Géol. France, t IV, n° 4 p. 651-657.

Dennis, 1967. International tectonic dictionary : English terminology. American Association of Petroleum Geologists, Mem. 7, 196 p.

Demets C., Gordon R.-G., Argus D.-F., Stein S., 1994. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophys. Res. Letters*, 21. p. 2191-2194.

Despeyroux J., Godefroy P., 1986. Nouveau zonage sismique de la France.

Diracca A., 1999. Géométrie et cinématique d'une écaille de la couverture décollée de la zone alpine externe : le chevauchement de la Rocca Seira. Mémoire de maîtrise, Université de Nice. 34 p.

Dominique P. et Blès J.-L., 1996. Séisme d'Annecy (Haute-Savoie, France) du 15 juillet 1996 : rapport de mission. Rapport BRGM R39029, 55 p.

Dubar M., Perez J.-L., 1989. Quaternary neotectonics bordering on the subalpine "Arc de Nice". *C.R. Acad. Sci. Paris* 308, p. 1485-1490.

Dubar M., Gugliemi Y., 1991. Néotectonique quaternaire et sismicité de l'arc de Nice et de la marge ligure. Livret d'excursion de l'AFEQ du 9 au 11 mai 1991.

Dubar M., Gugliemi Y., Falgueres C., 1992. Néotectonique et sédimentation côtière quaternaire en bordure de l'arc subalpin de Nice. (Alpes-maritimes. France) *Quaternaire*, 3, 3-4 p. 105-110.

Duval A.-M., 1994; Détermination de la réponse d'un site aux séismes à l'aide du bruit de fond : Evaluation expérimentale. Thèse de doctorat, Université P. et M. Curie, Paris.

Duval A.-M., Bard P.-Y., Meneroud J.-P., Vidal S., 1994. Usefulness of microtremor measurements for site effect studies. In *Proc. Tenth eur. Conf. On Earthquake Engineering Research Institute*, Oakland, California.

Dubar M., et Geist H. 2003. séisme du 20 juillet 1564, carrière de meules de Cap d'Ail. Extrait de *ARCHEAM* n°11 (2003-2004), p. 53-56.

Dominguez S., 2003. Structural map of the region. Tectonic history of the region. Special page in *algerian earthquake* May 21 st, 2003. European Mediterranean Seismological Centre. http://www.emsc-csem.org/Html/ALGER_210503.html.

-E-

EMS, 1998. European Macrosismic scale (EMS-98), l'échelle macrosismique européenne sous la direction de Grünthal G., édition Française Levret A. *Cahiers du centre Européen de Géodynamique et de séismologie*, Volume 19, 103 p.

Esteva L., 1988. The Mexico earthquake of September 19, 1985. Consequences, lessons, and impact on research and practice. *Earth. Spect.*, 4 (1988) p. 413-426.

Eva C., Rabinovich, A., 1997. The 23 February 1887 tsunami recorded on the ligurian coast, western Mediterranean, *Geophys. Res. Letters*, 24, 17, p. 2211-2214.

-F-

Ferrari G., 1991. The 1887 Ligurian earthquake : a detailed study from contemporary scientific observations. *Tectonophysics*, 193, p. 131-139.

Field E.-H., Clement A.-C., Jacob K.-H., Aharonian V., Hough S.-E., Friberg P. A., Babaian T.-O., Karapetian S.-S., Hovanesian S.-M., and Abramian H.-A. 1995a. Earthquakes site response study in Giurmri (formerly leninakan), Armenia, using ambient noise observations. *Bull. Seism. Soc. Am.*, SA 85, p. 349-353

Field E.-H., Jacob K.-H., 1995b. A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 85, 4, p. 1127-1143.

-G-

Gaffet S., Cultrera G., Dietrich M., Courboux, F., Marra F., Bouchon M., Caserta A., Cornou C., Deschamps A., Glot J.-P., Guiget R., 2000. a site effect study in the Verchiano valley during the 1997 Umbria-Marche (Central Italy) earthquakes. *Journal of seismology*, ISSN 1383-4649. volume 4, Issue Number 4. p. 525-541.

Gelis C., 2002. La crise sismique de Blausasc dans les Alpes Maritimes (2000) : localisation absolue et relative. D.E.A. Dynamique de la lithosphère, des marges océaniques aux chaînes de montagne. Université de Nice – Sophia Antipolis.

Genessaux M., Maufret A., Pautot G., 1980. Les glissements sous-marins de la pente continentale niçoise et la rupture de câbles en mer ligure (Méditerranée Occidentale), *C.R. Acad. Sci. Paris*, 290, série D, 1980, p. 959-962.

GEMGEP, 2005. Le risque sismique à Nice. Apport méthodologique, résultats et perspectives opérationnelles. Rapport final. 52p.

GEO-TER, 2002. Révision du zonage sismique de la France, étude probabiliste. Synthèse de l'étude. Rapport n° GTR/MATE/0701-150 synthèse, affaire n° 1601. Ministère de l'Ecdologie et du Développement Durable.

Gèze B., 1960. La genèse néogène de l'arc de Nice (Alpes-Maritimes) CR Som SGF, p. 33-34.

Gèze B., Lanteaume M., 1963. Carte géologique de Menton-Nice, Editions BRGM.

Gèze B., 1968. Carte géologique de la France au 1/50 000° feuille menton-nice WWWVII-42-43 n° 973 BRGM Editions, Orléans.

Grellet B., Combes P., Granier T., Philip H., 1993. Sismotectonique de la France métropolitaine dans son cadre géologique et géophysique, *Mem. Soc. Geol. France* 164, 24 pl.

Guardia P., Ivaldi J.-P., 1985. Les déformations schistogènes du tégument de l'Argentera (Alpes-Maritimes, France) dans son cadre géodynamique. *Proc Fifth International Symposium Landslides*, Lausanne, p. 1323-1327.

Guardia P., Ivaldi J.-P., 1996. Paléotectonique linéamentaire et tectonique active des Alpes-Maritimes franco-italiennes : une synthèse. *Géologie de la France n°1* : p. 43-55.

Gutenberg B., Richter C.-F., 1956. Magnitudes et energy of earthquakes, *Annali di geofisica*, 9, P. 1-15.

-H-

Hays W.W., 1986. Site amplification of earthquake ground motion. In *Proc. U.S. national conf. On Earth. Eng. CHARLESTON. USA.*

Hebert H., Alasset P.-J. 2003. The tsunami triggered by the 21 may 2003 Algiers earthquake. *Newsletter CSEM n°20*. p. 10-12.

Hoang-Trong P., Haessler H., Holl J.-M., Legros Y., 1987. L'essaim sismique (oct. 83 - jan. 84) de la moyenne vallée de la Roya (Alpes Maritimes) : activités récentes d'un ancien système de failles conjuguées. *C.R. Acad. Sci. Paris* 304, p. 419-424.

Hobbs 1905. Lineaments of the Atlantic border region. *Geological Society of America Bulletin*, 15, p. 483-506.

Huntington J.-F., Raiche A.-P., 1978. A multi-attribute method for comparing geological lineament interpretations. *Remote Sensing of Environment*, 7, 2, p. 145-161.

-I-

Iaworsky G., Le Calvez Y., Guerin J.-M., 1973. Précisions sur l'âge de la Néotectonique qui a affecté les poudingues pliocènes du Var à Nice (Alpes-Maritimes) *C.R. Acad. Sci., Fr.*, 277 D : p. 909-911.

Irr F., 1984. Paléoenvironnements et évolution géodynamique néogènes et quaternaires de la bordure Nord du bassin Méditerranéen occidental – un système de pente de la paléo-marge liguro-provençale. Thèse de doctorat d'Etat mention sciences – université de Nice.

Ivaldi J.-P., 1973. Contribution à la thermoluminescence à l'étude des séries « Grès d'Annot ». Origines du matériel détritique. Conséquences paléogéographiques. Thèse 3^e cycle, Nice, 162 p.

Ivaldi J.-P., Guardia P., 1986. Déformation paléogène précoce de la couverture sud-orientale du massif de l'Argentera (Alpes-Maritimes, France) *C.R. Acad. Sci. Fr.* 303 (2), p 1605-1610.

Ivaldi, J.-P., 1989. Thermoluminescence et orogénèse. Les Alpes occidentales au Paléogène. Thèse d'habilitation à la direction des recherches en Sciences de la Terre, Nice, 330 p.

Ivaldi J.-P., Guardia P., Follaci J.-P., Terramorsi S., 1991. Plis de couverture en échelon et failles de second ordre associés à un décrochement dextre de socle sur le bord nord-ouest de l'Argentera (Alpes-Maritimes, France). *C.R. Acad.sci.,FR.*, 313. (2). p. 361-368.

Ivaldi J.-P., 2003. Pénétrante du Paillon - Tunnel de la Condamine, réalisation d'une coupe géologique prévisionnelle suivant le tracé du projet du tunnel routier de la Condamine - groupement d'entreprises Campenon - Bernard, Eiffage et Nicoletti. 15 p.

Ivaldi J.-P. et Ganoulis J., 2003. Gis setting of satellite images and digital terrain model for deep groundwater detection in karst environment : the case of Almyros spring, Heraklion, Crete, Greece. XXXe IAHR Congress, Thessaloniki, Greece, 24-29 August 2003, theme B : saltwater intrusion, p. 589 – 596.

Ivaldi J.-P., Bellon H., Guardia P., Mangan C., Müller C., Perez J.-L, Terramorsi S. 2003. Contexte lithostructural, âges ⁴⁰K-⁴⁰Ar et géochimie du volcanisme calco-alkalin tertiaire de Cap-d'Ail dans le tunnel ferroviaire de Monaco. *C.R. Géosciences* 335 (2003). p. 411-421

-J-

Jolivet L., Faccenna C. 2000. Mediterranean extension and the Africa-Eurasia collision Tectonics, Vo. 19 bo 6, p. 1095-1106.

JPM, 2002. Réglementation parasismique de la Principauté de Monaco, définition de la méthode d'obtention des spectres en surface et réévaluation du séisme de référence. n° 02-07 du 8 avril 2002. Rapport au Département des Travaux Publics et des Affaires Sociales de Monaco, 28 p.

Julian M., 1976. Rapport et cartes inédits au 1/250.000°, B.R.G.M.

-K-

Kresic N. 1995. Remote sensing of tectonic fabric controlling groundwater flow in Dinaric karst. *Remote sens. Environ.* 53. p. 85-90.

-L-

Lacave C., Bard P.-Y., Koller M.-G., 2003. Microzonation techniques and examples.

Lachet C., Hatzefld D., Bard P.-Y., Theodulidis N., Papaioannou C., Savvaidis A., 1996. Site effects and microzonation in the city of Thessaloniki Greece. Comparison of different aproaches. *Bull. Seism. Soc. Am.* 86, 6, p. 1692-1703.

Langston C.-A. 1979. Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic P and S waves. *J. geophys. Res.*, 84, p. 4749-4762.

Laugeri S., 1979. Tremblement de terre à Toudon. Extrait de la revue culturelle bilingue nissart-français « Lou Sorgentin » numéro d'octobre 1979.

Lambert J., Levret A. 1996. Mille ans de séismes en France. Ouest Editions Presses Académiques, Nantes, 120p.

Lambert J., 2003. Extraits de données épacentrales 5°37-9°13 ; 41°55-45°31 Base de données SisFrance 2003. export ARN-JL-03-L-401.

Larroque C., Béthoux N., Calais E., Courboux F., Deschamps A., Déverchère J., Stéphan J.-F., Ritz J.-F., Gilli E., 2000. Joint multidisciplinary studies of active faults and seismic hazard at the junction between southern french alps and ligurian basin, in : Abstract volume Paleosis, Han-sur-Lesse (belgium) 13-17 march 2000, p. 89-92.

Larroque C., Béthoux N., Calais E., Courboux F., Deschamps A., Déverchère J., Stéphan J.-F., Ritz J.-F., Gilli E., 2001. Active and recent deformation at the southern Alps – Ligurian basin junction Netherlands Journal of Geosciences / Geology en Mijnbouw 80 (3-4) : p. 255-272.

Laurent O., 1998. Modalités de la structuration d'un prisme de front de chaîne : l'exemple de l'arc de Castellane (chaînes subalpines Méridionales, France) thèse université Nice - Sophia Antipolis, 280 p.

Laurenti A., 1998. Les tremblements de terre des alpes maritimes, Serre Editeur, Nice 175 p.

Laurenti A., 2001. Le séisme ligure de 1887 : révision des intensités macrosismiques à la lumière du contexte historique local – Revue d'Analyse Spatiale, n° spécial "tectonique active et géomorphologie" actes du colloque de Villefranche-sur-mer 18-22/10/2000.

Lebrun B., 1997. Les effets de site, étude expérimentale et simulation de trois configurations. Thèse de doctorat de l'université Joseph Fourier Grenoble I. 208 p.

Lemoine M., De Gracieny P.-C., Tricart P., 2000. De l'océan à la chaîne de montagnes – tectonique des plaques dans les Alpes – SGF Collection Géosciences.

Lermo J., Chavez-Garcia F.-J., 1993. Site effect evaluation using spectral ratios with only one station . *Bull. Seism. Soc. Am.* 83, 5, p. 1574-1594.

Levret A., Cushing M., Peyridieu G., 1996. Etude des caractéristiques des séismes historiques en France. IPSN, paris, 399 p.

Lillesand et Kieffer, 1987. Remote sensing and image interpretation. 2^{ème} édition, John Wiley & Son 721 p. 3^{ème} édition 1994.

-M-

Madeddu B., Béthoux N., Stéphan J.-F., 1996. Champs de contraintes post-pliocène et déformations récentes dans les Alpes sud-occidentales, bulletin de la société géologique de France (7) 167 : p. 797-810.

Madeddu B., 1997. Sismotectonique des alpes sud-occidentales et de la marge nord-ligure. Thèse de doctorat de l'université de Nice - sophia Antipolis. 218 p.

Mari J.-L., Glangeaud F., Coppens F., 1997. Traitement du signal. *Ed. Technip*. 460p.

Meyer B., Armijo R., Dimitrov D., 2001. Active faulting in SW Bulgaria : possible surface rupture of the 1904 Struma earthquakes. *Geophysics. J. Int.* (2002) 148. p. 246-255.

Mercalli G., 1897. I Terremoti della Liguria e del Piemonte – Napoli – Istituto Nazionale de Geofisica de Roma. p. 109-111

Ministre de la guerre. 1887. Extraits de divers rapports du service local du Génie sur les effets du tremblement de terre du 23 février 1887. *C.R. Acad. Sciences*. Vol. 104. p. 884 à 887.

Mondielli P., Bethoux N., Meneroud J.-P., Duval A.-M., 1995. The prevention of seismic risk in the proincipality of Monaco. Proceedings of the fifth international conference on seismic zonation, Nice, France. Ouest Editions, Presses académiques, Vol. 1. p. 841-848.

Mondielli P., Ivaldi, J.-P., Méneroud J.-P., Portolano P., 2000. Redéfinition du séisme de référence de la Principauté de Monaco. Phase 1 : inventaire photogéologique, toponumérique et morphostructural des structures linéaires à potentiel sismogène. Colloque Riviera 2000. Tectonique active et géomorphologie, Villefranche-sur-Mer 18-22 octobre 2000, *Revue d'Analyse Spatiale*, N° spécial, 2001.

Mondielli P., Bethoux N., Gaffet S., 2002. Action for seismic risk prevention in Monaco, sites effect study. XXVIII General Assembly European Seismological Commission, Genoa 1-6 September 2002. Book of abstracts. P. 127.

Mouroux P., Le Brun B., Depinois S., Bertrand E., Masure P., 2004. Projet européen RISK-UE. Application à la ville de Nice, Rapport final. Document BRGM/RP-53202-FR. 137 p.

Mulder T., 1993. La vitesse de courant de turbidité de 1979 à Nice: apports de la modélisation. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t.317, série II, p. 1449-1455.

-N-

Nakaruma Y., 1989. A method of dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *QR of RTRI*, 30, 1, p. 25-33

Naquet J.-M., Calais E. 2003. Crustal velocity field of western Europe from permanent GPS array solutions, 1996-2001. *Geophys. J. Int.*, 154, p.72-88.

Nicolas M., Béthoux N., Madeddu B., 1998. The instrumental seismicity of the Western Alps : a revised catalogue – *Pure and Applied Geophysics* 152 (4) : p. 707-731.

Nogoshi M., et Igarashi T., 1971. On the propagation characteristics of micro tremor, *Jour. Seism. Soc. Japan*. Vol 23, p. 264-280.

-P-

Pecheux J. -F., 1979. Le poudingue de Roquebrune-Cap Martin (Alpes-Maritimes). DEA, Nice, 25 p.

Pecker A., 1984. Dynamique des sols. Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1984.

Pégoraro O., 1972. Application de la microtectonique à une étude de néotectonique sur le golfe maliaque (Grèce centrale). Thèse 3^e cycle, Montpellier : p. 41.

Perez J.-L., 1975. Etude structurale de la zone limite entre l'arc de Nice et l'arc de la Roya – Thèse de l'université de Nice.

Perez J.-L., 1975. La zone limite entre l'arc de Nice et l'arc de la Roya – Bull. Soc. Géol. De France, 7, p. 930-938.

Perez J.-L., 1991. Etat du suivi géotechnique -SNCF- Galerie de reconnaissance vallon Ste Devote ; Principauté de Monaco. Engeco-Cogefar - Rapport CETE Méditerranée, Nice.

Perez J.-L., Terramorsi S., 1998. Suivi des travaux de creusement de la gare SNCF de Monaco. Documents de synthèse, Rapports CETE Méditerranée, Nice.

Petrovski D., 1986. Probabilistic approach for evaluation of seismic design parameters. IAEA *Specialists meeting on earthquake Ground Motion and anti seismic Evaluation of nuclear power plants*, Moscou.

Pirelli Cavi , 1995. Savona-Monaco, Fibre optic submarine cable system, cable route survey, Campaign : November 1994. Finaly report January 1995. I.S.M. A4327/P4505.

-R-

Rebaï S., 1988. Le champ de contrainte actuel en Europe et dans les régions méditerranéennes. Etude du décrochement senestre pli-quaternaire de Laghet-Peille – DEA Univ. de Montpellier 36 p.

Réhault J.-P., 1981. Evolution tectonique et sédimentaire du bassin ligure (Méditerranée Occidentale). Thèse d'Etat, Paris VI. p. 132.

Rehault J., Bethoux N. ,1984. Earthquakes relocation in the Ligurian sea (westearn Mediterranean): geological interpretations: Marine Geology, 55, 429-445.

Reasenber, P.-A. , Oppenheimer, D., 1985. FPIT, FPLOT and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions, US Geol. Surv. Open-file report, 85-739.

Riepl J., Bard P.-Y., Hatzfeld C., Papaioannou C., Nechtschein S. 1997. Detailed evaluation of site response estimation methods across and along the sedimentary valley of Volvi (Euro-seistest). *Bull. Seis. Soc. Am.* 88. p. 498-502.

Ritz J., 1986. Evolution du champ de contraintes dans l'arc de Nice depuis 25 millions d'années. DEA Univ. Montpellier, 50 p.

Ritz J., 1991. Evolution du champ de contraintes dans les Alpes du Sud depuis la fin de l'Oligocène. Implications sismotectoniques, Phd thesis, University of Montpellier II, France.

Ritz J., 1992. Tectonique récente et sismotectonique des Alpes du Sud : analyse en terme de contraintes – Quaternaire, 3, (3-4) 1992 p. 11-124

Rogers A.-M., Borchardt R.-D., Covington P.-A. and Perkins D.-M., 1984. A comparative ground response study near Los Angeles using recordings of Nevada nuclear tests and the 1971 San Fernando earthquake. Bull. seism. Soc. Am. 74 p 1925-1949.

-S-

Sabetta-Pugliese 1987. Attenuation of peak horizontal acceleration et velocity from Italian strong motion records, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol 77.

Sabourault P., 1998. Brevet : simulateur de chocs, déposant : commissariat à l'énergie atomique. Inventeur : Sabourault P., Defauchy J., Mariotti C., Sibony S., n° PUBLICATION / 2777682, date de publication 22/10/1999.

Sabourault P. 1999. Du microzonage à la prédiction de mouvements forts: confrontation de mesures de terrain, de simulations numériques et de modélisations sur modèles réduits centrifugés. Thèse 3^e cycle, Paris. 211 p.

Saunders et Young, 1983. Rate of the surface process on slopes, slope retreat and denudation. *Earth Surf. Proc. And Landforms*, 8, p. 473-501.

Schroetter J.-M., 1997. L'enregistrement sédimentaire de la déformation Mio-Plio-Quaternaire sur la bordure ouest de l'arc de Nice – DEA Dynamique de la lithosphère, des marges océaniques aux chaînes de montagnes.

Seed H.-B., Whitman R.-V., Dezfulian H., Dobry R., Idriss I.-M., 1972. Relationships between soil conditions and building damage in the 1967 Caracas earthquake. *Journal of the soil mechanics and foundations division*.

Singh S.-K., Lermo J., Dominguez T., Ordoaz M., Espinoza J.-M., Mena E., Quass R., 1988. The Mexico earthquake of September 19, 1985. A study of amplification of seismic waves in the valley of Mexico with respect to a hill zone site. *Earth Spect*; 4 p. 653-673

-T-

Tento A., Franceschina L., Marcellini A., 1992. Expected ground motion evaluation for Italian sites. Proc.10 th World conf. On earthquake Engineering., Madrid, A.A. Balkema, Rotterdam, Vol 1, p. 489-494.

Theodulidis – Papazachos, 1990. Dependence of strong ground motion on magnitude-distance, site geology and macroseismic intensity for shallow earthquakes in Greece. 1. Peak horizontal acceleration, velocity and displacement, *Soil Dyn. And earth*.

Théodulidis N., Bard P.-Y., Bouchon M., 1996. Horizontal to vertical ratio and geological conditions : the case of the Garner Valley down hole array in southern California, *Bull. Seism. Soc. Am.* 86, 2, p. 306-319.

-U-

USGS 1996. Response to an urban earthquake Northridge 94. Report write by USGS for the federal Emergency Management Agency. Open file Report 96-263.

-W-

White K., 1993. Image processing of Thematic Mapper data for discriminating piedmont surficial materials in the Tunisian southern Atlas. *International Journal of Remote Sensing*, 14, p. 961-977.

ANNEXES

Annexe 1 : Les séismes historiques – dégâts et cartes isoséistes.

Annexe 2 : La télédétection et les rayonnements.

Annexe 3 : Le Modèle Numérique de Terrain et les variables morphotectoniques.

Annexe 4 : Modèle Carey-Gailhardis et Mercier.

Annexe 5 : Journal de Monaco du 1^{er} mars 1887.

Annexe 6 : Rapport hebdomadaire mairie secousse février 1887.

Annexe 7 : Rapport de la Commission des Travaux Publics, séisme de 1887.

Annexe 8 : Rapport sur les dégâts constatés au Palais suite à la secousse de 1887.

Annexe 9 : Méthodologie utilisée pour la détection des séismes et des tsunamis.

Annexe 1 : Les séismes historiques – dégâts et cartes isoséistes.

- le 23 juin 1494, 31 km de Monaco, $M = 5.5$

Quelques dégâts immobiliers à Lantosque, Roquebillière, la Bollène-Vésubie et à Utelle sont notés (Laurenti, 1998) avec de nombreux éboulements destructeurs près de ces localités (Bosio, 1902).

- le 20 juillet 1564, 33 km de Monaco, $M = 5.5$

Ce séisme « Nissart » a fait 800 à 900 morts environ et 7 localités sont complètement détruites. Il s'agit de Rimplas, La Bollène, Roquebillière, La Roche, Saint Jacques de Valdeblore, Belvédère et Saint Dalmas de Vadeblore (Cadiot, 1979).

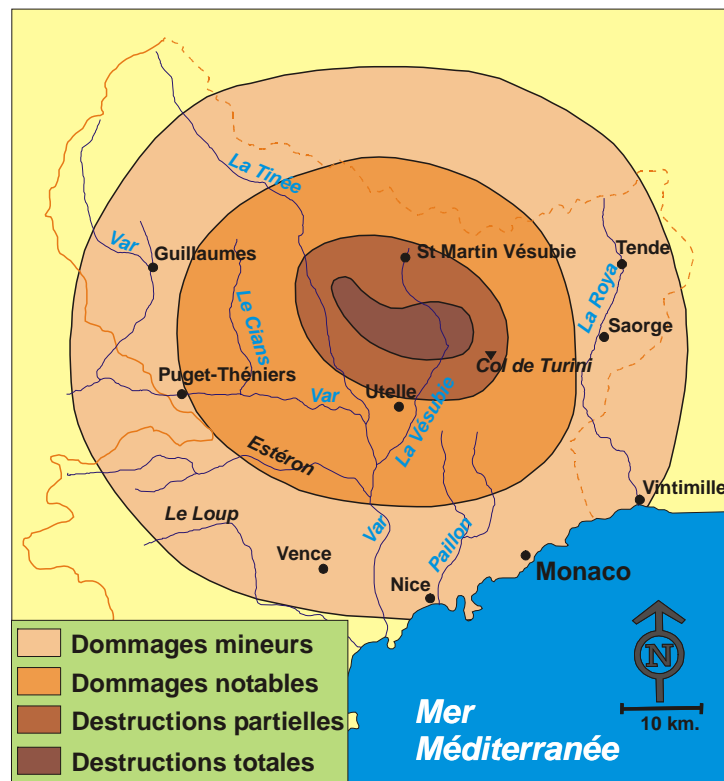


Figure 107 : zones de dommages du séisme de 1564

Les victimes et les dégâts se répartissent de la manière suivante (Cadiot, 1979 ; Laurenti, 1998)

- Roquebillière : 300 morts,
- La Roche : 50 morts,
- La Bollène : 250 morts,
- Belvédère : 50 morts,
- Lantosque : 3 morts,
- Venanson : 21 morts,
- Penne : destruction du château et de 14 maisons,

- Saorge, la Brigue, et Vintimille : les châteaux de Saorge, de la Brigue et de Vintimille sont endommagés,
- Clans : une dizaine de maisons s'écroulent sur leurs habitants.

De nombreux éboulements créent des barrages sur la Vésubie et sur le Paillon.

A Antibes, Nice et Monaco, exceptés quelques mouvements de mer, aucun dommage sérieux n'est observé.

- le 18 janvier 1618, 23 km de Monaco, $M = 5.5$

A Utelle, 5 personnes sont mortes dans les décombres de leur maison, à Lantosque de nombreux dégâts sont à déplorer et enfin à Nice de fortes secousses furent ressenties sans causer de dégâts (Mercalli, 1897).

A Duranus, Roccasparvière et Coaraze des maisons et des fermes se sont écroulées (Bosio, 1902), quelques fissures sont observées au château de Saorge (Baretto, 1901).

A Roccasparviera, le canal d'acheminement d'eau du village est endommagé et le lieu de captage est affaissé de plusieurs mètres. Cette catastrophe aurait incité les habitants à abandonner peu à peu le village pour celui de Duranus situé en contrebas sur le versant de la Vésubie (Canestrier, 1930).

- le 15 février 1644, 34 km de Monaco, $M = 5.5$

A Toudon, c'est un éboulement qui est à l'origine de la destruction d'une trentaine de maisons, 36 personnes y sont mortes, essentiellement des femmes et des enfants car les hommes étaient partis aux champs (Laugeri, 1979).

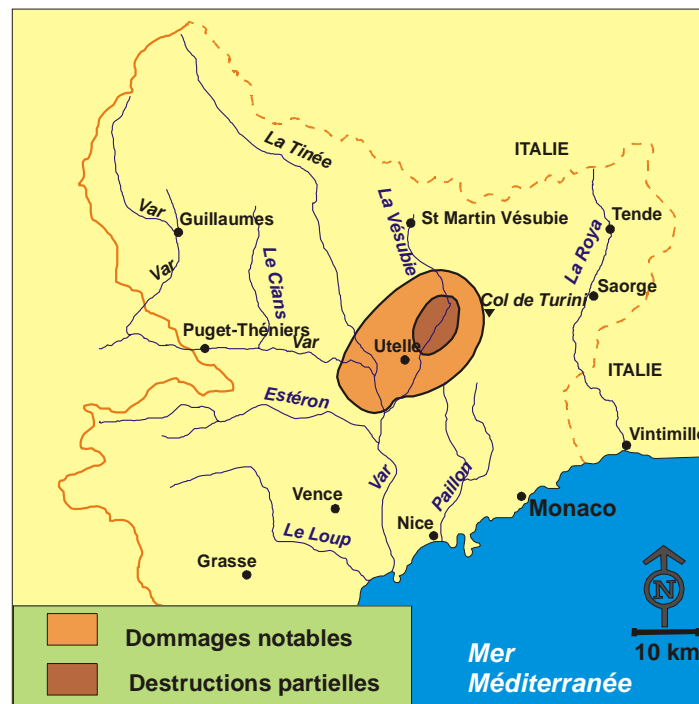


Figure 108 : zones de dommages lors du séisme de 1644

A Belvédère on dénombre 3 victimes, à La Bollène et à Roquebillière quelques personnes sont blessées, à Lantosque l'église et les habitations sont ruinées.

Un journal, publié à Gênes le 12 mars 1644, confirme l'événement et complète l'information en évoquant la désolation de cinq terres dans le Comté de Nice et en Provence, ainsi que la mort d'un certain nombre de paysans.

La secousse a été ressentie également à Alessandria, à Grasse, à Fréjus, à Marseille, à Aix et à Gap.

- le 26 mai 1831, 40 km de Monaco, M= 5.5

Ce séisme affecte la Ligurie à une cinquantaine de kilomètres de Monaco.

Castellaro près de Taggia est le village le plus touché par ce séisme. On y dénombra 5 morts et 17 blessés graves. A Taggia même, une femme périt dans l'effondrement de sa maison. A Bussana, Pompeiana, Terzorio, Ventimiglia, Perinaldo et Castelvitorrio ce sont essentiellement des dégâts matériels qui sont à déplorés (Laurenti, 2005).

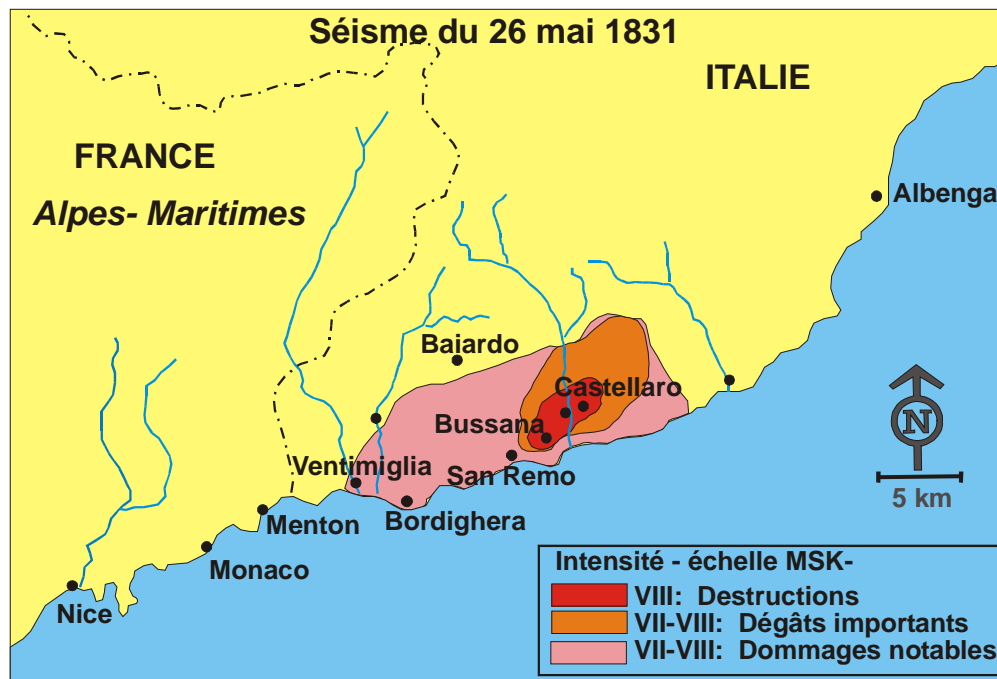


Figure 109 : Zones des dommages lors du séisme du 26 mai 1831 (d'après Laurenti, 2005)

- le 23 février 1887, 89 km de Monaco, M= 6

Ce séisme est présenté dans le corps du texte.

Annexe 2 : La télédétection et les rayonnements.

Le rayonnement réfléchi est produit essentiellement par le soleil, et les systèmes qui le détectent sont appelés *passifs*, parce que l'énergie artificielle n'est pas nécessaire.

L'énergie détectée par les systèmes de télédétection est une fonction de l'énergie partagée entre la source et les matériaux qui réagissent dans le chemin vers le capteur. L'énergie peut être transmise, absorbée, réfléchie par la surface, ou émise encore une fois dans une autre longueur d'onde.

Les roches sont des ensembles de minéraux, donc leur spectre est une combinaison de tous les minéraux constitutifs. Les minéraux étant un ensemble d'atomes variés, liés entre eux par différents types de liaisons.

Les éléments les plus abondants dans les roches et les minéraux sont l'oxygène, le silicium et l'aluminium, avec des teneurs moins importantes en fer, magnésium, calcium, sodium et en potassium, et de très faibles teneurs d'autres éléments.

L'absorption ou la réflexion dans des longueurs d'ondes différentes dépendent de la symétrie, du degré de distorsion de la maille élémentaire et du nombre de coordinations des ions dans les minéraux différents. Par exemple, les électrons dans les ions métalliques disposent d'une énergie suffisante pour se transférer facilement d'un ion à l'autre. C'est cette propriété qui explique la grande conductivité électrique des métaux. Dans un minéral, la transition similaire est appelée transfert de charge. Le transfert de charge le plus commun se produit quand les électrons migrent du fer à l'oxygène donnant une absorption dans une large bande de longueur d'onde inférieure à 0.55 μ m.

Dans la partie visible et infrarouge proche du spectre, les transitions les plus importantes dans les minéraux sont celles qui sont associées à la présence d'ions OH⁻ ou de molécules d'eau. Des caractéristiques d'absorption à 1.9, 1.4, 1.14 et 0.94 μ m témoignent de la présence de la molécule de l'eau dans les minéraux. Plusieurs silicates et minéraux altérés contiennent des ions hydroxyles (OH)⁻, dans lesquels il y a une seule transition fondamentale de la liaison O-H⁻ à 2.7 μ m. Cette absorption peut être renforcée dans les minéraux Mg-OH et Al-OH avec une absorption à 2.3 et 2.2 μ m respectivement. Ces caractéristiques sont importantes dans les micas alumineux et dans les minéraux argileux. Elle permettent de distinguer ces minéraux des autres hydroxydes.

Des transitions similaires caractérisent les carbonates. Elles dérivent de l'allongement de la liaison C-O dans les ions CO₃²⁻ en donnant une absorption dans l'infrarouge proche vers 2.3 μ m.

Annexe 3 : Le Modèle Numérique de Terrain et les variables morphométriques.*- La pente du terrain*

La valeur de la pente, en un point (x,y) exprime le gradient de la surface topologique. Elle peut être estimée par la magnitude de la première dérivée d'une variable spatiale [Dikau, 1990; Hammond, 1964; Strahler, 1956; Wood et Snell, 1960]. Pour un MNT $z=f(x,y)$ la magnitude du gradient (∇f) (pente) en un point (x,y) est calculée par la formule suivante [Gonzalez et Woods, 1992]:

$$(\nabla f) = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2}$$

où $\frac{\partial f}{\partial x}$ et $\frac{\partial f}{\partial y}$ sont respectivement des dérivées partielles de la fonction (MNT) en chaque point.

La pente du terrain (i.e., le gradient topographique), est probablement la mesure la plus descriptive de la topographie. Théoriquement, la pente mesure le taux du changement de l'altitude sur une longueur finie et par conséquent elle est très sensible à la taille du pixel. La valeur calculée est d'habitude inférieure ou égale à la valeur mesurée sur le terrain. Un autre paramètre important est la direction de la pente en un point donné du MNT. L'angle de la direction de la pente est calculé par la relation :

$$\alpha = \arctg \left(\frac{\frac{\partial f}{\partial y}}{\frac{\partial f}{\partial x}} \right) . [Gonzalez et Woods, 1992].$$

- la Courbure

La courbure est la magnitude de la deuxième dérivée de l'altitude et exprime le taux de changement des pentes d'une surface topologique [Pike, 1988]. Elle permet d'estimer la rugosité de la surface.

Pour un MNT $z=f(x,y)$ la courbure peut être estimée en calculant le Laplacien :

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \text{ où } \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \text{ et } \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \text{ sont respectivement des dérivées partielles de deuxième}$$

degré de la fonction (MNT) en chaque point.

Les dérivées partielles peuvent être calculées en utilisant le filtre Laplacien.

- Relief ombré

Bien que la visualisation en pseudo couleurs exprime plus à fond l'information tenue dans les données, la couleur masque les caractéristiques spatiales de la haute fréquence dans les données. L'indication plus importante de la profondeur dans les images topographiques est l'ombrage causé par l'illumination solaire. Un algorithme pour simuler l'illumination solaire est basé sur la première dérivée d'altitude intégrant la direction et la valeur de la pente. La valeur de chaque pixel correspond théoriquement à l'intensité de la lumière réfléchie (I), calculée par la relation mathématique entre la pente du terrain et sa direction, la position du soleil et la position de l'observateur [Horn, 1981]. Cette relation peut être calculée par la loi du cosinus de Lambert :

$$I = K_d \cos(i)$$

- i : angle entre le rayon incident et le vecteur perpendiculaire à la pente du terrain
- K_d : coefficient estimant le pouvoir réfléchissant de la surface du matériau.

Il est possible d'obtenir ainsi des éclairages plus réalistes en variant la direction et l'angle d'incidence des rayons.

La visualisation du relief ombré est une procédure plus simple permettant d'obtenir à la fois, le grand contexte régional (synoptique), nécessaire à l'interprétation des caractéristiques générales de la surface, et les détails précis ayant une signification géologique.

Annexe 4 : Méthode Carey-Gailhardis et Mercier

Dans cette méthode, le glissement lié à la rupture sismique (assimilé au vecteur glissement du mécanisme au foyer) est considéré comme colinéaire à la contrainte tangentielle ζ sur la faille d'une part et s'effectuant sur une faille pré-existante d'autre part. Un tenseur des contraintes est obtenu par inversion d'un jeu de vecteurs glissements.

Le tenseur retenu est celui qui minimise l'écart entre le vecteur glissement « observé » (dédit du mécanisme au foyer) et le vecteur glissement théorique (contrainte tangentielle ζ). Le tenseur résultant de l'inversion est décrit par la direction et le plongement des axes principaux de contraintes ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) ainsi que par le rapport de forme $R = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\sigma_3 - \sigma_1)$. Le calcul d'un tenseur des contraintes à partir des mécanismes au foyer nécessite de connaître le vecteur glissement et donc le plan de rupture parmi chaque couple de plans nodaux.

Pour les événements de magnitude suffisamment forte, le plan de rupture peut être déduit par exemple de la répartition spatiale des répliques. Pour tous les séismes pour lesquels aucune indication de rupture, autre que le mécanisme au foyer, n'est disponible, il faut discriminer le plan de rupture de son conjugué durant l'inversion. C'est le cas de la plupart de nos données puisqu'il s'agit de séismes de faible magnitude.

Le critère utilisé est le rapport R . En effet, un seul plan est en accord avec le tenseur des contraintes, pour ce plan, R est compris entre 0 et 1. Si le vecteur glissement correspondant à un plan remplit ce critère, le deuxième ne le remplit pas. Il peut arriver que les deux plans nodaux se croisent au niveau d'un axe principal des contraintes, alors les deux remplissent ce critère. Lors de l'inversion nous cherchons à déterminer quatre inconnus : les trois axes principaux de contraintes (σ_1, σ_2 et σ_3) et le rapport de forme R . Un minimum de 4 données est alors nécessaire.

Un jeu de données est de bonne qualité si les pendages et les directions des plans nodaux sont variés et occupent l'ensemble du canevas afin de contraindre au mieux la position des axes. Un vecteur glissement de mécanisme au foyer « s » est considéré comme compatible avec un tenseur de contraintes si l'angle entre s et ζ est inférieur à 20° . Un résultat d'inversion est considéré comme contraint si au moins 80% des écarts sont de cet ordre et si la solution est stable. Une solution est stable quand elle ne change pas lorsque les paramètres d'entrée de l'inversion varient.

JOURNAL DE MONACO

POLITIQUE, LITTERAIRE ET ARTISTIQUE

PARAISANT LE MARDI

Monaco, le 1^{er} Mars 1887

Nouvelles Locales

La Principauté de Monaco a eu mercredi matin un effrayant réveil. A six heures, un bruit souterrain, épouvantable et rapide comme la foudre, suivi de craquements sinistres des habitations, s'est fait entendre. C'était un tremblement de terre !

Trois secousses successives, en moins de dix minutes, ont ébranlé violemment le sol. Certaines maisons, notamment celles à plusieurs étages, ont été terriblement remuées surtout dans leur partie supérieure où, en raison de l'élévation, les oscillations se montraient plus fortes. Les habitants, surpris, se sont de suite précipités dans les rues. Heureusement il y avait eu, pour nous, plus de peur que de mal, et l'on a pu immédiatement constater que la Principauté en était quitte pour des dégâts matériels relativement insignifiants : crevasses à quelques maisons, chutes de cheminées, de balcons et de corniches et couronnements.

Le temps était magnifiques, aucun nuage ne masquait l'horizon, et le soleil, quelques instants après, apparaissait comme à l'ordinaire. Avec le jour, les esprits semblaient se rassurer, quand, vers huit heures et demie, une quatrième secousse assez forte vient encore épouvanter la population. Craignant de nouveaux tremblements, les locataires des habitations à plusieurs étages, n'osant plus rentrer chez eux, prennent le parti de passer la journée dehors – seuls, ceux qui demeurent au rez-de-chaussée, restent et donnent asile aux premiers. –

Vers neuf heures, on apprend qu'à Nice et à Menton les effets du cataclysme ont été terribles. Menton, notamment, est cruellement éprouvée, plusieurs maisons se sont écroulées, un grand nombre menacent ruines, une partie de la ville est évacuée ; à Nice, les malheurs sont moins grands, mais ils causent dans la population une véritable terreur. On parle de morts, de blessés ; la panique est indescriptible.

Ces nouvelles jettent la consternation à Monaco, et nous remercions du fond de cœur la Providence d'avoir épargné notre cher pays.

A midi et demi, un frémissement terrestre, d'une seconde à peine, vient encore jeter l'alarme dans le public, dont l'émotion s'était accrue des tristes nouvelles venues des environs. On se décide alors à établir des campements pour la nuit. La place du Palais, la Place d'Armes, le terrain des héritiers Blancs, rue Louis, la Place du Casino, tous les endroits un peu vaste, se couvrent dans la soirée de tentes et de baraques. Les jardins sont transformés en camps, des feux sont allumés, et de nombreux habitants passent la nuit dehors. A deux heures du matin, autre secousse qui réveille les dormeurs et alarme tout le monde. Le lendemain, quelque légères trépidations s'étant encore fait sentir, et dans la crainte de voir se continuer le tremblement de terre, on croit prudent de prendre les mêmes précautions.

Ce n'est que samedi matin que, tout à fait rassurée, la population monégasque a repris son train de vie habituel, fortement impressionnée, néanmoins, par le récit des catastrophes qui ont jeté la désolation dans les pays voisins.

Pendant ces deux jours, Son Excellence le Gouverneur Général, M. Dugué, Secrétaire Général, M. le Comte Gastaldi, Maire, se sont prodigués, visitant sans relâche les endroits où étaient signalés quelques dangers à redouter et portant à tous, avec des encouragements, un précieux témoignage de la sollicitude du gouvernement. Une commission composée du personnel et du

Comité des Travaux Publics, a successivement examiné les habitations crevassées ordonnant les mesures immédiates à prendre pour leur consolidation, ou leur évacuation si elles n'offraient plus assez de sécurité. Ces dernières sont au nombre de quatre, encore leur évacuation a-t-elle été seulement une précaution en vue d'oscillations à venir. C'est ainsi que la compagnie des gardes d'honneur a été jeudi installée dans les petits quartiers du Palais, et que les carabiniers de la rue du Milieu sont provisoirement logés à la Condamine, dans les nouvelles maisons Nave, jusqu'à ce que les réparations nécessitées par l'ébranlement des murs et des cloisons des deux casernes aient été faites.

Là se borne la description que nous pouvons faire. Nous ne saurions terminer sans remercier le Ciel qui a si visiblement protégé la Principauté.

En le faisant, nous sommes l'interprète de toute la population qui se joindra jeudi prochain, à notre Premier Pasteur et au vénérable clergé de Monaco, en adressant à la Providence ses prières pour les infortunes voisines, et ses chants d'actions de grâces pour avoir permis que notre pays ait échappé si miraculeusement au désastre général.

Voici, d'après les renseignements recueillis le jour même par M. le Docteur Gueirard, qui a bien voulu nous les communiquer, les indications qu'on a pu noter dans la Principauté, pendant le tremblement de terre, le 23 février :

Première secousse, 5 h 57, bientôt suivie d'une seconde plus puissante. Ces deux secousses ont été séparées par un faible intervalle. Elles avaient le caractère oscillatoire et vibratoire. Leur durée totale a été de 30 secondes. La deuxième secousse, qui a présenté une trépidation très saccadée, a duré 6 secondes. Direction des oscillations : Nord-Est à Sud-Ouest. (d'après ce que M. Gueirard a observé à Menton, il y a eu un mouvement giratoire.)

Neuf minutes après, troisième secousse d'une durée d'une seconde, oscillations de l'Est à l'Ouest.

A 8 h 28, quatrième secousse composée de trois violentes vibrations, durée une demi-seconde.

D'après l'échelle de Rossi-Pons, l'intensité des secousses peut se déterminer comme suite (intensité de 1 à 10) :

		Monaco	Menton
1 ^{er}	secousse	V	V
2 ^{ème}	"	VII	IX
3 ^{ème}	"	IV	IV
4 ^{ème}	"	VI	VII

Ce tremblement doit être classé dans les grands tremblements de terre au point de vue de l'étendue.

Aire sismique de forme ovulaire ; grand diamètre, de Lyon, Genève à Rome. Centre sismique vers Diano-Marina. L'aire sismique est exactement semblable à celle du 27 novembre 1884. Ce tremblement n'est pas d'origine volcanique, et, par conséquent, n'a aucun rapport avec le Vésuve ou l'Etna. Il est orographique (du au mode de formation des montagnes) à une fracture de la croûte terrestre.

La vague marine a été relativement très faible : 0^m 60.

Annexe 6 : Rapport hebdomadaire Mairie de Monaco secousse février 1887

**Rapport Hebdomadaire
Du
20 au 27 Février 1887**

Le 22, le Gouverneur a adressé au Secrétariat le télégramme qui suit :
"Secrétaire Général en à ce matin chambellan de S.A.R. Le Prince de Saxe-Weimar".

Le 23, le Gouverneur a télégraphié au Secrétariat :
"Deux secousses tremblement de terre, dont première durée une minute, très distinctement ressentie ce matin à six heures. Gouvernement Général et Secrétaire Général visité immédiatement Monaco. Aucun dégât sérieux constaté. Rapports de police Monte-Carlo et Condamine concordent".
"Nouvelle secousse courte, mais violente. Caserne garde très lézardée. Télégraphie Nice pour demander tentes".

Le Secrétariat a répondu :
"Très inquiet si tremblement a causé autres dégâts importants que ceux Caserne réponse télégraphique".

Le même jour, le Gouverneur a adressé au Secrétariat les télégrammes ci-après :
"Préfet de Nice télégraphie sinistres importants à Nice, impossible envoyer tentes. Urgence absolue évacuer logements. Colonel et Capitaine Paul, Casernes Gardes et Carabiniers Monaco-Ville. Vue circonstances toutes exceptionnelles, loué au mois appartements maison Nave pour Colonel, Capitaine et Carabiniers. Discipline et bon ordre nécessitent maintien gardes réunir sur rocher. Aucune autre installation provisoire et immédiate possible que écuries Palais et gymnastique. Visité maison par maison Monaco-Ville et Condamine. Dégâts peu importants, mesures prudence ordonnées et prises. Visité Palais avec Commandant, grave dégâts bâtiments, du Nord. Secrétaire Général et moi partons pour la Condamine pour continuer visites et rassurer population campant dehors".
"Il est sept heures, rentrons de Condamine et Monte-Carlo. Grande panique chez les étrangers. Deux cent départs environ, presque pas d'arrivées. En dehors du Palais, des Casernes, dégâts peu importants, pas de dangers immédiats, pour habitants, mais presque toutes les maisons plus ou moins lézardées. Gardes d'honneur et Carabiniers Monaco installés comme l'a annoncé précédente dépêche. Recommandations et mesures de prudence faites et prises d'une façon générale pour nuit prochaine. Rapport détaillé va suivre. Villes du voisinage cruellement éprouvées, Menton notamment, si nouvelles apportées par voyageurs sont vraies".

A la même date, nouvelle dépêche au Secrétariat ainsi conçue :
"Installez gardes écuries, Palais et gymnastique. Prince approuve toutes dispositions que vous croirez devoir prendre. Continuez à tenir Secrétariat au courant de tous les dégâts".

Le 24, le Gouverneur a télégraphié au Secrétariat :
"Rapport détaillé expédié hier soir. Anxiété entretenue par nouvelles secousses durant la nuit et la matinée paraît se calmer un peu. Beaucoup de personnes ont passé la nuit sur les places. Aucun nouveau dégât constaté. Temps toujours beau. Beaucoup d'étrangers partent".

Le 26, le Gouverneur a télégraphié au Secrétariat :
"Comité des Travaux Publics, dans réunion d'urgence de jeudi, a désigné Commission pour visiter maison endommagées. Tournée terminée hier soir. Rapport conclut aucune nouvelle évacuation, ni démolitions nécessaires, se borne indiquer réparations les plus urgentes. Pas de nouvelles secousses".

Le même jour, le Secrétariat a transmis au Gouverneur Général la dépêche suivante :

"Faites connaître que le Prince regrettant que son âge et ses infirmités toujours croissantes, ne lui permettent pas de se rendre immédiatement à Monaco, envoie le Prince Héréditaire, son Fils bien-aimé, pour apporter à la population qu'il affectionne, un témoignage de son paternel intérêt et calmer ses inquiétudes. Le Prince Héréditaire arrivera après demain lundi à 5 heures et demie du soir".

Mercredi – jeudi – vendredi. Les journées et l'on peut presque ajouter les nuits des 23, 24 et 25 ont été consacrées à parcourir la Principauté, à rassurer la population, à prescrire les mesures de prudence, aucune autre affaire n'a pu être traitée pendant ces trois jours, durant lesquels des notes spéciales ou des télégrammes ont rendu compte des événements.

Des bâches prêtées par la Société des Bains ont été dressées en forme de tentes, pour abriter la population pendant la nuit, des brasiers fournis par la Direction du Gaz et garnis par elle de combustibles, ont été établis et allumés dans le voisinage de ces tentes. Des campements particuliers ont été installés aussi sur plusieurs points dans des terrains vagues.

Le 25, le Comité des Travaux Publics réuni d'urgence, a désigné une commission spéciale pour examiner les dégâts, étudier les mesures à prendre et proposer les travaux les plus urgents dans l'intérêt de la sécurité publique.

Cette tournée a duré toute l'après-midi du jeudi et toute la matinée du vendredi.

Le Comité des Travaux Publics réuni à 1 heure $\frac{1}{2}$ a entendu le rapport de la commission. Monsieur le Maire de Monaco, présent à la réunion va prendre un Arrêté de conformité de l'art. 154, de l'Ordonnance sur la Police Générale, afin d'ordonner aux propriétaires les travaux les plus pressants, dans les délais indiqués par ledit rapport.

Ces travaux auront exclusivement pour but la consolidation de certaines maisons ou parties de maison ébranlées et lézardées sans qu'il ait été jugé nécessaire d'en ordonner l'évacuation. Du reste les habitants ont abandonné d'eux-mêmes les logements les plus endommagés et n'y veulent pas rentrer. Quant aux bâtiments appartenant au Domaine, un devis des réparations nécessaires, va être dressé et envoyé au Secrétariat.

Annexe 7 : Rapport de la Commission des Travaux Publics, séisme de 1887

**Rapport des Visites de la Ville de Monaco
pour constatations des dégâts par le séisme
du 22 Février 1887**

Lecture est donnée de deux rapports de la Commission indiquant les immeubles qu'elle a visités successivement et les réparations qu'il sera nécessaire d'exécuter pour les réparer ou les consolider. Les maisons plus particulièrement atteintes sont les suivantes, pour lesquelles le Comité estime qu'il y a lieu de prendre les mesures ordinaires en vue de la sécurité publique et spécialement savoir :

1° - Quartier de Monaco-Ville.

Maison rue des Briques n° 1 appartenant à 4 propriétaires : Veuve Aurégia Antoine, Antoine Crovetto, Daniel et veuve Crovetto.

Placer des chaînages à tous les étages.

Les locaux loués pour le bureau de l'enregistrement dans une dépendance de la maison Vedel. Lors de la réparation principale, faire chaîner au 1er étage les murs qui séparent les deux maisons et celui donnant sur la promenade Sainte Barbe, en ajoutant des chaînages transversaux.

Les deux maisons n° 22 et 24, rue du Milieu, faisant saillie sur l'alignement général du côté de la rue des Briques, auraient besoin d'être chaînées fortement et réparées, néanmoins elles ne menacent pas ruines.

Les deux maisons en face du chevet de la Cathédrale étant sujettes à reculement et constituant un obstacle permanent et regrettable à la circulation, et toute réparation confortative étant interdite par la loi, le Comité, après en avoir délibéré est d'avis qu'il y aurait lieu de faire l'application des articles 2 et 5 de l'Ordonnance du 4 mai 1862 et d'inviter en conséquence M. le Receveur des Domaines à tenter d'abord de traiter à l'amiable avec les propriétaires pour le règlement de l'indemnité qu'entraînerait la cession à la voie publique de la partie non susceptible de consolidation, ni reconstruction.

Les maisons n° 14 rue du Milieu

Quelques plâtras de la corniche menacent ruine sur la rue des Briques. Le 2^{ème} étage de cette maison sur la rue des Briques appartient au nommé Philiberti dont la situation d'esprit et de fortune ne permettent pas d'espérer qu'une communication, même officielle ait aucun résultat utile. En raison de cette situation, et vu le peu d'importance des réparations urgentes, le Comité exprime l'avis qu'il y avait lieu, dans l'espèce, de procéder d'office à la réfection de la corniche.

Le 2^{ème} étage rue du Milieu appartenant aux hoirs Boisson.

Le mur de la façade fait ventre et il y aurait lieu de placer des tirants au niveau du 2^{ème} étage et des combles au mur Est, et à ceux de la cage d'escalier, et leur intermédiaires entre les rues du Milieu et des Briques.

2° - Quartier de Monte-Carlo.

Villa Sans-Souci, à M. Lopau, boulevard Peirera non habitée et en vente actuellement.

Le Comité est d'avis qu'il y a lieu d'interdire l'habitation dans cette maison jusqu'à ce que les réparations aient été effectuées.

Hôtel des Colonies, rue de la Scala et avenue de la Costa, à Mme Erhard-Charassin.

Il y a lieu de réparer la toiture, de remplacer par des poitrails en fer les deux linteaux (en bois probablement), de réparer les cloisons et plafonds, et de démolir la portion de l'attique longeant l'avenue de la Costa ou, de consolider le tout.

Villa des Roses, 43 boulevard des Moulins, aux héritiers Blanc, occupée par le Clergé de l'église Saint-Charles.

Les dommages sont très graves et la maison doit être évacuée. Il conviendrait de ne pas laisser ignorer la situation au mandataire des héritiers Blanc, auquel une mise en demeure d'exécuter les réparations nécessaires, devra être notifiée en vertu de l'Arrêté Municipale.

Maison Imperty, descente des Moulins.

Dommage importants à réparer. IL y a lieu de prescrire le chaînage de la maison au niveau du rez-de-chaussée, du 1^{er} étage et des combles, la reprise des fondations du mur donnant du côté de la voie ferrée, la réparation des cloisons et le remplacement des linteaux en bois, des fenêtres du sous-sol, par des linteaux en fer.

Sous le bénéfice de ces observations,

Le Comité,

Après en avoir délibéré,

Est d'avis qu'il y a lieu d'adopter les rapports de la Commission.

Par conséquent, il conviendrait de prescrire en outre savoir.

A Monaco-ville

Maison Hancy, 2 rue du Tribunal

Chaîner le mur Sud et le mur de refond au niveau du premier étage, du second et des combles. Refaire les piliers sur la terrasse et réparer les cloisons intérieures.

3^{ème} étage, Jean Gastaud, rue de l'Eglise n° 6.

Chaîner au niveau du 2^{ème} étage dans le sens de la rue de l'Eglise. Chaîné pareillement en couronnement par mesure de précaution, si on reconnaît qu'aucun chaînage n'a été fait.

Maison de Sigaldi, rue des Briques (télégraphe).

Murette à consolider.

3^{ème} et 4^{ème} étage, Sianesi, 29 rue Basse.

Remanier la toiture.

Maison Clément Ciais, 5 rue des Briques.

Chaîner entre les rues des Briques et du Milieu.

Maison de Loth, 26 rue des Briques.

Chaînage pour relier les murs entre eux.

Magasin Domanial, même rue.

Reporter un peu vers le milieu la porte sise à l'angle, remplacer le linteau en bois pourri, par un linteau en fer, et reprendre l'angle sur environ 2 m 50 de hauteur.

Chapelle de la Miséricorde, rue Basse (Bâtiment Domanial).

Vérifier et sonder avec soin pour se rendre compte de l'importance des fentes. Voir si les tirants sont munis d'ancres et remplissent leur office.

Maison Claude Campana, 8 rue Milieu.

Chaîner dans le sens de la rue du Milieu à la rue des Briques.

Maison Joseph et Louise Lefranc et Nicolas Olivier, 10 rue du Milieu.

Chaîner dans le sens de la rue du Milieu à la rue des Briques.

Maison Laforest de Minotti, Hôtel de la Pais, 1 rue Basse.

Réparer et chaîner.

Maison Louis Bozone, rue Basse, 10.

Réparer et chaîner.

Maison Etienne Sauvaigo, Michel Olivier, Emmanuel Rué, 4 rue de l'Eglise.

Chaîner à tous les étages.

A la Condamine.

Maison Borghini, boulevard de la Condamine.

Chaîner le mur donnant sur la cour intérieure, à diverses hauteurs ; placer quelques tirants transversaux suivant les murettes de la cage d'escalier.

A l'occasion de ces réparations le Comité exprime le vœu qu'au point de vue de la salubrité publique, de la solidité et du bon aspect, une disposition générale, omise jusqu'ici dans les Ordonnances sur la matière autorisé le Maire ou le Comité à faire recrépir et badigeonner toutes les maisons dont les façades sont en mauvais état, ainsi que cela se pratique en France.

On pourrait, en outre, ajouter dans les conditions générales d'autorisation, imposées aux nouvelles constructions, l'obligation de "poser les attiques, non sur les toits, mais sur les murs même" afin d'éviter le retour des menaces à la sécurité publique, résultant de l'écroulement trop facile des attiques qui ne reposent point sur une base solide.

La présente Délibération sera soumise à l'approbation de Son Altesse Sérénissime.

Fait à Monaco, les jours mois et an que dessus.
Signé au Registre Baron de Farincourt,
Dugué, de Clausade, Arnourd, Comte Gastaldi, Chevalier Lombard,
Douhin, Turrel, Chevalier de Loth.

Pour copie conforme,
Le Secrétaire des Comités,
Signé : Chevalier de Loth

Approuvé :
Signé : Charles

Annexe 8 : Rapport sur les dégâts constatés au Palais suite à la secousse de 1887

Principauté de Monaco
Inspection des Travaux
Publics

Rapport sur les dégâts constatés au Palais à la suite des tremblements de terre du 23 et 24 février 1887

ans la journée du 23 février courant nous avons accompagné matin et soir Son Excellence Monsieur le Gouverneur Général dans les visites qu'Elle a faites dans les diverses maisons de la Principauté qui avaient paru le plus endommagées, et dans le Palais.

Ce n'est donc que dans la matinée du 24 que nous avons pu visiter en détail le Palais avec Monsieur le Commandant du Palais et Monsieur Ajani Entrepreneur pour examiner les dégâts survenus à la suite des tremblements de terre du 23 et 24 février courant.

Dans l'après midi du 24 nous avons du de nouveau nous rendre dans les maisons endommagées (comme faisant partie d'une commission spéciale nommée ad-hoc) et nous consacrons notre matinée du 25 à rendre compte des dégâts que nous avons constaté au Palais.

Les grands appartements ont très peu souffert car nous n'avons constaté qu'une simple fissure de mur transversal entre la Salle Grimaldi et le Salon Vert. Les murs de façade, les planchers, les plafonds n'ont eu aucun mal.

La Salle à manger n'a absolument rien, sauf 2 petites fissures aux angles de corniche qui n'ont aucune importance.

Le vestibule a eu son plafond fendillé.

Le Salon d'attente a eu son plafond fendillé (mais très peu).

La Galerie des Glaces a souffert davantage des fentes assez considérables se sont produites au plafond, formé de bois et plâtre.

Une fente assez prononcée s'est déclarée dans le mur séparant cette pièce du Salon Rouge et du Cabinet de Travail de S. A. S. Elle règne de bas en haute, entre les deux portes et elle s'explique par la faiblesse du trumeau qui est entouré d'ouvertures assez considérables et qui ont subi, lors de la réparation de ces pièces, des remaniements importants. On se rappelle qu'il y avait même en ce point un surplomb de 0^m20 entre le mur de la pièce et le mur des combles.

Dans le Salon Rouge il ne s'est produit qu'une fissure au plafond le long d'un encadrement. Elle s'aperçoit peu et ne présente absolument aucun danger.

Dans le Salon de Famille nous avons constaté quelques fendillement au plafond voûté, et on peut reconnaître que le mal va en augmentant du Sud au Nord et que c'est vers la Tour du Pavillon et l'aile Nord du Palais dont nous allons parler tout à l'heure que l'effet du tremblement s'est le plus fait sentir.

La Salle des Gardes n'a rien.

La chambre à coucher de S. A. S. , le cabinet de toilette situé dans la Tour et l'antichambre ont été assez éprouvés. Le plafond de la première pièce est tout fendillé et a besoin d'être refait. Celui de l'alcôve peut être conservé et n'a besoin que de simples raccords de même celui de l'antichambre. Le mur séparant le cabinet de toilette de l'antichambre a été fendillé. De même la voûte qui fait saillie sur la fenêtre du cabinet de toilette du côté de la cour de la Mairie et qui supporte le passage des archives.

Plusieurs autres fissures existent dans les murs et il sera indispensable de procéder de ce côté à des vérifications plus minutieuses pour bien examiner les travaux à exécuter d'autant plus que la Tours du Pavillon elle-même a eu son mur est donnant sur la place assez lézardé au-dessus et au-dessous de la plus haute fenêtre et demande à être entourée, sur ses 4 faces, de chaînage en fer. Non loin de là, le corridor a subi aussi quelques détériorations. Les murs longitudinaux ayant été fendillé de même le Secrétariat dont un des murs celui est, déjà fendillé antérieurement, à vu cette fente s'agrandir autant qu'on peut en juger le visa.

Une autre fente, petite il est vrai, s'est produite sur le même mur.

Le corps de bâtiment qui comprend la Trésorerie, la 2^{ème} Salle à manger et la Bibliothèque a peu souffert. Nous craignons plus particulièrement pour les parties supérieures qui, on s'en souvient, étaient dans un état tel qu'on avait jugé indispensable avant d'y installer la bibliothèque de placer des tirants dans les deux sens. Ces tirants ont sans doute produit leur effet à part quelques légères fentes et une dégradation au tableau de la fenêtre (résultant des cadres en fer et en bois ayant forcé sur les côtés) il n'y a rien de particulier à signaler.

En allant vers les archives du secrétariat on aperçoit au point A, une fente de mur qui provient sans doute de l'ébranlement général de la Tour.

Dans les archives même, des fentes, mais peu sérieuses. Dans le passage qui précède et sur la terrasse donnant sur la Place du Palais très peu de choses.

La galerie Nord a été plus particulièrement ébranlée par le tremblement du sol, et l'importance des dégâts à signaler doit être attribuée à notre avis, 1° à la poussée des voûtes du rez-de-chaussée, 2° à la mauvaise qualité des planchers, 3° aux charges fort lourdes que ces planchers ont à supporter, les murettes de division ne venant généralement pas du bar et portant ainsi entièrement sur ces planchers.

En commençant par le rez-de-chaussée nous constatons tout d'abord une fente longitudinale au beau milieu du plafond voûté des archives.

Ces voûtes ont toujours été reconnues mauvaises et les arcs doubleaux n'existent pas en réalité, ce qu'en paraît au mortier est fendu à la clef.

Des fentes analogues règnent au plafond voûté de la Galerie des Armes. Il y a donc eu poussée des voûtes contre les murs.

Ce mouvement de poussée s'est manifesté contre le mur Sud situé sous la Galerie des Armes et delà sur celui situé en avant et donnant sur la cour d'honneur. Il est fort heureux que ce dernier ait été élevé après coup et monté sur de bons piliers au lieu de deux simples lézardes qui n'apparaissent presque pas et qu'on voit seulement vers la corniche il eut pu être renversé d'un seul coup en oscillant autre de la ligne horizontale qui correspond au niveau des reins des voûtes des archives.

Le mur ayant résisté ce sont les planchers qui ont forcé, et qui ont pour ainsi dire été coupés et détachés du mur par une fente qui tient toute la longueur de la galerie.

Les murs de division aux 2 étages ont été fracturés par cet écartement.

Ainsi pour cette aile du Palais on peut constater à chaque pièce le mouvement de poussée signalé et les ruptures de plancher et de murs transversaux.

Pour réparer ces dégâts et y remédier autant que possible à l'avenir nous ferons des propositions ultérieures après un nouvel examen. Disons toutefois que si on relit les causes auxquelles nous attribuons les dégâts il sera facile de déterminer les travaux à faire pour y apporter remède.

1° Pour la poussée des voûtes – supprimer ces voûtes et les remplacer par des planchers en fer.

2° Refaire les planchers du 2^{ème} étage (qui tremblent comme liège à la moindre secousse).

3° Mettre des poutrelles supplémentaires ou des poitrails en dessous des murettes pour leur donner toute solidité.

De plus des tirants allant du Sud au Nord seraient très utiles sinon indispensables.

L'appartement dit du Commandant du Palais a subi des dégâts analogues, mais moindre, ayant été maintenu de part et d'autre par les ailes en retour. Néanmoins, deux plafonds voûtés de 2 pièces donnant sur la terrasse de la Chapelle sont à refaire ayant été entièrement fendillés (les bois sont du reste vermoulus).

Dans le Salon une fente à un angle de mur du côté Sud-Ouest. Dans la Salle à manger, fente au plafond mais qui n'entraîne pas la réfection.

Dans l'aile Ouest en retour bâtie en 1866 il n'y a aucun dégât.

A la Chapelle, une fente au mur de façade donnant sur la place, mais cette fente n'est visible à l'intérieur et se trouve à côté des grandes baies cintrées. Fentes aussi à l'intérieur de la lunette de la coupole, mais légères.

A titre de remarque, disons que l'appartement de Sa Grandeur a le moins souffert de tous ceux de la galerie du Nord 1^{er} étage. A part une fente intérieure au-dessus de la fenêtre du salon il n'y a rien, tandis que dans tous les autres appartements il y a fracture de plancher et de murs transversaux. Mais à côté, le corridor I a ses deux murs fendillés. L'escalier I, trois fentes au mur.

Dans l'appartement des sœurs n° 7, 8, 9 il n'y a aucun dégât, ces pièces ayant été enserrées entre le massif de la galerie Nord et la terrasse bordant la Place du Palais, et reposant pour ainsi dire sur la base de la Tour du pavillon.

Dans les appartements longeant le corridor A nous avons visité les combles ou mansardes. Il n'y a en fait que de petits dégâts, résultant de fentes aux plafonds ou aux cloisons.

Dans les pièces 67, 68, 69 et dans l'appartement au-dessous habité par le Chef Jardinier. Rien.

Dans les pièces du rez-de-chaussée du Palais donnant sur la grande terrasse des Jardins, et dans celles correspondantes donnant sur la Galerie des Armes. Rien ou très peu de chose.

Dans l'appartement du Suisse, lingerie et tout ce côté, très peu de chose aussi, quelques nouvelles fentes au plafond voûté du vestibule d'entrée.

Enfin, dans le bâtiment de la Mairie formant une dépendance du Palais, il y a eu des fendillements assez sérieux à la Grande Salle du 1^{er} étage.

En plusieurs points crevasses au plafond cintré en bois, et détachement des plâtres. Le mur Nord donnant sur la rampe Major est fendillé sur toute la longueur de la Salle de la Mairie à 1^m environ au-dessus du sol de cette pièce ce qui peut amener, peut-être l'obligation d'établir un chaînage transversal.

L'Inspecteur des Travaux Publics

Monaco le 25 Février 1887

Annexe 9 : Méthodologie utilisée pour la détection des séismes ou des tsunamis

Cette méthode de détection est utilisée avec succès depuis près de deux ans par le système d'alerte sismique de Monaco au travers d'un algorithme développé par Yann Ageon. Elle a été appliquée dans cette thèse pour la détection de tsunamis.

La méthode utilisée pour filtrer le signal est appelée SSA (Singular Spectrum Analysis). C'est une méthode basée sur le calcul des vecteurs propres d'une matrice d'autocovariance. La série temporelle est projetée dans la base de vecteurs propres. On obtient alors les vecteurs principaux qui contiennent l'information pertinente alors que le bruit est représenté par des vecteurs dont la direction est non principale.

soit la série temporelle :

$$\{x_i(t) : i = 1, \dots, N\}$$

soit la matrice d'autocovariance :

$$D = \begin{pmatrix} x(t)_1 & K & x(t)_M \\ M & O & M \\ x(t)_{N-M+1} & L & x(t)_N \end{pmatrix} \quad M : \text{terme de retard}$$

On en déduit la matrice de Toeplitz :

$$C_D = N^{-1} D D^T$$

On calcule puis on trie les vecteurs propres (ils déterminent la trajectoire de la matrice) par décomposition en valeurs singulières :

$$\{V_{k,j} : j = 1, \dots, M; 1 \leq k \leq M\}$$

On obtient alors les composantes principales :

$$A_k(t) = \sum_{j=1}^M x(t+j)V_{k,j} \quad \text{avec } t = 0, \dots, N-M$$

On peut alors reconstruire le signal :

$$R_\beta = \frac{1}{M_t} \sum_{k \in \beta} \sum_{j=1}^M A_k(t-j)V_{k,j} \quad \text{avec } M \leq t \leq N-M$$

Le nombre de composantes principales β utilisées pour reconstruire le signal est déterminé suivant le critère « AIC order-selection ». Ce critère permet de séparer les vecteurs propres du signal pertinent de ceux correspondant au bruit.